



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

DYNAMICKÉ MODELY VÝROBNÍCH MODULŮ

DYNAMIC MODELS OF POWER-GENERATING MODULES

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Marek Kopečka

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

BRNO 2021

Bibliografická citace práce:

KOPIČKA, Marek. Dynamické modely výrobních modulů. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/135681>. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Jiří Drápela.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji doc. Ing. Jiřímu Drápelovi Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, vstřícnost, věcné připomínky a dialogy během mého studia. Děkuji doc. Ing. Petru Tomanovi, Ph.D. a všem kolegům Ústavu elektroenergetiky za rady, sdílení znalostí a podporu během vytváření této práce. Děkuji institutu Vysokého učení technického v Brně za možnost být součástí jeho historie. Děkuji své ženě Kristýně za psychickou oporu a trpělivost a děkuji své rodině za podporu a motivaci nejen během doby mého studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 13.4.2021

.....

ABSTRAKT

Dizertační práce se zabývá návrhem konceptu a realizací modelů prvků elektrizační soustavy s ohledem na možnosti potenciálu využití výpočetních programů – simulací. Řešení práce se zaměřuje jednak na simulace souladu výrobních modulů dle RfG (Requirements for Generators), jako dokumentu stanovujícího požadavky na připojení výroben elektrické energie a jednak na problematiku chytrých sítí, resp. MAS (multiagentních systémů). Rámec práce je tak vymezen oblastí požadavků na výrobní moduly dle legislativních požadavků (nejen RfG, ale i navazujících norem vč. PPDS, ČSN EN 50438 a ČSN EN 50549), požadavků na funkce agentů a schopnosti práce výrobního modulu v synchronním a ostrovním provozu, včetně přechodů mezi nimi, procesu synchronizace (fázování) a komunikace mezi jednotlivými prvky elektroenergetického systému.

KLÍČOVÁ SLOVA: RfG; PPDS; výrobní modul; simulace souladu; MAS; model synchronního výrobního modulu (SVM); model nesynchronního výrobního modulu (NVM); model agenta; PSCAD

ABSTRACT

The dissertation thesis deals with the design of the concept and implementation of models of electrical power system elements with regard to the potential of the use of computer programs – simulations. The solution of the thesis focuses on the compliance simulations of power-generating modules according to RfG (Requirements for Generators), as a document which setting out the requirements for the connection of power-generating facilities and also focuses on the issue of smart grids and MAS (Multi-Agent Systems) respectively. The framework of the thesis is thus defined by the area of requirements for power-generating modules according to legislative requirements (not only RfG, but also related standards incl. DSC (Distribution System Code), CSN EN 50438 and CSN EN 50549), requirements for agent functionalities and power-generating module abilities to operate in synchronous and island operation, including transitions between them, the process of synchronization (phasing) and communication between the individual elements of the power system.

KEY WORDS: RfG; DSC; power-generating module; compliance simulations; MAS; synchronous power-generating module model; power park module model; agent model; PSCAD

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	16
1 ÚVOD	18
1.1 MOTIVACE	19
2 ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA ČR	20
2.1 PŘENOSOVÁ SOUSTAVA	30
2.2 DISTRIBUČNÍ SOUSTAVA	31
2.2.1 TOPOLOGIE DS.....	32
2.2.2 ELEMENTY ES.....	33
2.3 ŘÍZENÍ ES	40
2.3.1 TECHNICKO-ORGANIZAČNÍ PROSTŘEDKY PRO ZAJIŠTĚNÍ SYS	43
2.4 SETRVAČNOST SYSTÉMU	45
2.4.1 TECHNICKÉ MOŽNOSTI ZAJIŠTĚNÍ POŽADOVANÉ SETRVAČNOSTI SYSTÉMU	47
3 ZDROJE V ES.....	49
3.1 POŽADAVKY NA ZDROJE	49
3.1.1 POŽADAVKY NA VÝROBNÍ MODULY DLE RfG, PPDS A KODEXU PS.....	52
3.1.2 ZKOUŠKY A SIMULACE SOULADU PODLE RfG.....	71
3.1.3 ZKOUMANÉ JEVY	79
3.1.4 POŽADAVKY NA MODEL Y VÝROBNÍCH MODULŮ	80
3.1.5 METODIKA OVĚŘENÍ SOULADU S POŽADAVKY RfG - SIMULACE	81
3.2 VLASTNOSTI ZDROJŮ	88
3.2.1 ROZDÍLY MEZI IBG A SG.....	88
3.3 ŘÍZENÍ ZDROJŮ.....	92
3.3.1 U/F A P-Q REGULACE.....	93
3.3.2 ŘÍZENÍ ČINNÉHO A JALOVÉHO VÝKONU.....	94
3.3.3 REGULACE VÝKONU ZDROJE	95
3.3.4 PQU REGULACE	96
3.4 OCHRANY	97
3.5 TESTOVÁNÍ ZDROJŮ	101
4 OSTROVNÍ PROVOZ	102
4.1 TECHNICKÉ VYMEZENÍ V RÁMCI ES	103
4.2 DETEKCE OP	104
5 MULTIAGENTNÍ SYSTÉMY	105
5.1 ARCHITEKTURY MAS.....	106
5.2 AGENT OBECNĚ	107
5.2.1 AGENT V ELEKTROENERGETICKÉ SÍTI	107
5.3 MOŽNOSTI MAS V ES.....	108
5.3.1 FLISR	108

5.3.2 EKONOMIKA A OPTIMÁLNÍ PROVOZ	108
5.3.3 ŘÍZENÍ MIKROSÍTÍ	109
5.4 DĚLENÍ AGENTŮ	109
5.5 KOMUNIKACE.....	110
5.6 OCHRANY	112
6 MODELOVÁNÍ A SIMULACE	113
6.1 SIMULACE V OBLASTI ČASOVÉ VS. FÁZOROVÉ (EMT VS. RMS)	114
6.2 TYPY MODELŮ VM.....	115
6.2.1 AVERAGE AŽ FULL MODELŮ	116
6.3 STÁVAJÍCÍ MODELŮ PRVKŮ SÍTÍ.....	118
6.4 VERIFIKACE MODELŮ	119
6.5 PSCAD.....	119
6.5.1 UŽIVATELSKÝ INTERFACE PROGRAMU PSCAD	120
6.5.2 DEFINICE A FORTRAN	122
6.6 KNIHOVNA PRVKŮ PROGRAMU PSCAD.....	122
6.6.1 MĚŘENÍ NAPĚTÍ A PROUDU	124
6.6.2 MĚŘENÍ FREKVENCE	124
6.6.3 KOMUNIKACE	125
7 DOSAVADNÍ VÝVOJ A SOUČASNÝ STAV	126
7.1 VLASTNOSTI ZDROJŮ	126
7.2 OSTROVNÍ PROVOZ	126
7.3 MULTI-AGENT SYSTEMS – MULTIAGENTNÍ SYSTÉMY	127
7.4 MODELOVÁNÍ A SIMULACE	127
7.4.1 MODELŮ VM	127
7.5 SHRUTÍ KAPITOLY	128
8 CÍLE PRÁCE	130
8.1 POŽADAVKY NA GENERÁTORY (RFG)	130
8.2 POŽADAVKY NA VLASTNOSTI ZDROJŮ	130
8.3 OSTROVNÍ PROVOZY A RESYNCHRONIZACE	131
8.4 MULTIAGENTNÍ SYSTÉMY	131
8.5 OBECNĚ POŽADOVANÉ VLASTNOSTI A FUNKCE	131
9 POŽADOVANÉ MODELŮ (CHARAKTERISTIKA A VLASTNOSTI)	132
9.1 POŽADAVKY NA MODEL ZDROJE.....	135
9.1.1 SIMULACE SOULADU PODLE RFG	138
9.1.2 VÝKONOVÉ CHARAKTERISTIKY	140
9.1.3 OCHRANY.....	142
9.1.4 KOMUNIKACE	144
9.1.5 FUNKCE MODELU ZDROJE	144
9.2 ARCHITEKTURA MODELU ZDROJE.....	154
9.3 POŽADAVKY NA MODEL AGENTA.....	155
9.3.1 FUNKCE MODELU AGENTA.....	156
9.4 ARCHITEKTURA MODELU AGENTA	158

9.5 POŽADAVKY NA MODEL SÍTĚ	158
9.6 ARCHITEKTURA MODELU SÍTĚ.....	159
9.7 OSTATNÍ MODELY	159
9.7.1 KOMUNIKAČNÍ ÚSTŘEDNA.....	159
9.7.2 FAULT-RIDE-THROUGH	160
10 MODELY PRVKŮ SÍTÍ (ARCHITEKTURA, FUNKCE A NASTAVENÍ).....	161
10.1 ZDROJE	162
10.1.1 SAMOTNÝ ZDROJ – U	164
10.1.2 SAMOTNÝ ZDROJ – IBG	165
10.1.3 SAMOTNÝ ZDROJ – SG	167
10.1.4 MĚŘENÍ	169
10.1.5 MĚŘENÍ – TESTOVACÍ	172
10.1.6 KOMUNIKACE	174
10.1.7 ŘÍZENÍ – IBG – M/S	176
10.1.8 ŘÍZENÍ – IBG – S.....	211
10.1.9 ŘÍZENÍ – SG – M/S.....	211
10.1.10 ŘÍZENÍ – SG – S	215
10.1.11 OCHRANY.....	215
10.1.12 SYNCHRONIZACE	223
10.1.13 VÝPLŇOVÉ MODULY ZDROJE	226
10.2 AGENT.....	226
10.2.1 VYPÍNAČ	227
10.2.2 MĚŘENÍ	230
10.2.3 KOMUNIKACE	231
10.2.4 OCHRANY.....	233
10.2.5 SYNCHRONIZACE	235
10.2.6 VÝPLŇOVÉ MODULY AGENTA.....	237
10.3 Síť	237
10.4 OSTATNÍ.....	240
10.4.1 FAULT-RIDE-THROUGH	240
11 SIMULACE PRO VALIDACE MODELŮ.....	243
11.1 SIMULACE SOULADU PRO VM.....	244
11.1.1 SIMULACE ODEZVY V OMEZENÉM FREKVENČNĚ ZÁVISLÉM REŽIMU PŘI NADFREKVENCÍ (LFSM-O).....	244
11.1.2 SIMULACE ODEZVY V OMEZENÉM FREKVENČNĚ ZÁVISLÉM REŽIMU PŘI PODFREKVENCÍ (LFSM-U).....	250
11.1.3 SIMULACE ODEZVY VE FREKVENČNĚ ZÁVISLÉM REŽIMU (FSM)	256
11.1.4 SIMULACE SCHOPNOSTI PŘEKLENOUT PORUCHU (FRT).....	266
11.1.5 SIMULACE OBNOVENÍ ČINNÉHO VÝKONU PO PORUŠE (POST FAULT ACTIVE POWER RECOVERY).....	270
11.1.6 SIMULACE OSTROVNÍHO PROVOZU (ISLAND OPERATION)	271
11.1.7 SIMULACE SCHOPNOSTI DODÁVAT JALOVÝ VÝKON (REACTIVE POWER CAPABILITY).....	276
11.1.8 SIMULACE DODÁVKY RYCHLÉHO PORUCHOVÉHO PROUDU (FAST FAULT CURRENT)	281
11.1.9 SIMULACE SCHOPNOSTI ZAJIŠŤOVAT UMĚLOU SETRVAČNOST (SYNTHETIC INERTIA).....	289
11.1.10 SIMULACE REGULACE TLUMENÍ VÝKONOVÝCH OSCILACÍ (PSS)	295
11.2 FUNKCE MODELŮ	296
11.2.1 PQU CHARAKTERISTIKY	296

11.2.2 MAS + OP + OCHRANY	300
11.3 BENCHMARKY	304
11.3.1 BENCHMARK 01 – HARMONICKÉ VS. KROK VÝPOČTU.....	304
11.3.2 BENCHMARK 02 – URČENÍ FREKVENCE V SIMULAČNÍM PROSTŘEDÍ	305
12 ZÁVĚR.....	312
12.1 SPLNĚNÍ CÍLŮ PRÁCE	312
12.2 SHRnutí POZNATKŮ A PŘÍNOSŮ PRÁCE.....	312
12.3 VÝZNAM A VYUŽITÍ DOSAŽENÉHO STAVU PRÁCE	313
12.4 DALŠÍ POSTUP.....	314
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	315
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	317
SEZNAM PŘÍLOH.....	326
SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA.....	327

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>obr. 2-1: Zjednodušené schéma PS ČR, vč. návazností na okolní PPS</i>	<i>31</i>
<i>obr. 2-2: Přibližná mapa území PDS ČR</i>	<i>32</i>
<i>obr. 2-3: Obecné typy topologie rozvodů (kresba převzata z [17])</i>	<i>32</i>
<i>obr. 2-4: Ilustrační příklad možného nechtěného zapůsobení ochrany RoCoF.....</i>	<i>39</i>
<i>obr. 2-5: Ilustrační příklad různého vyhodnocení derivace ochrany RoCoF</i>	<i>40</i>
<i>obr. 2-6: Blokové schéma funkce RoCoF</i>	<i>40</i>
<i>obr. 2-7: Struktura PpS</i>	<i>43</i>
<i>obr. 2-8: Služby výkonové rovnováhy.....</i>	<i>43</i>
<i>obr. 2-9: Instance řízení frekvence v rámci ENTSO-E [33].....</i>	<i>46</i>
<i>obr. 3-1: Typy výrobních modulů dle PPDS</i>	<i>50</i>
<i>obr. 3-2: Provozní frekvenční rozsah VM v sítích nn, vn a 110 kV dle PPDS</i>	<i>54</i>
<i>obr. 3-3: Rozsah napětí pro výrobní s připojené do sítě vn a 110 kV dle PPDS.....</i>	<i>55</i>
<i>obr. 3-4: Požadavky na dodávku/odběr jalového výkonu (VM A1) při U_n dle PPDS [47]</i>	<i>56</i>
<i>obr. 3-5: Regulace jalového výkonu VM A1 pro $P = P_D$ [47]</i>	<i>56</i>
<i>obr. 3-6: Požadavky na dodávku/odběr jalového výkonu (VM A2, B1, B2 a C) při U_n dle PPDS [47]</i>	<i>57</i>
<i>obr. 3-7: Dodávka/odběr jalového výkonu při maximální dodávce činného výkonu u SVM B1, B2, C a D [47]</i>	<i>58</i>
<i>obr. 3-8: Dodávka/odběr jalového výkonu při maximální dodávce činného výkonu u NVM B2, C a D [47].....</i>	<i>58</i>
<i>obr. 3-9: Dodávka/odběr jalového výkonu při nižší než maximální dodávce činného výkonu pro NVM kategorie B2, C a D [47]</i>	<i>59</i>
<i>obr. 3-10: Schopnost překlenutí poruchy pro výrobní se střídačem na výstupu [47]</i>	<i>60</i>
<i>obr. 3-11: Schopnost překlenutí poruchy přímo připojených generátorů [47]</i>	<i>60</i>
<i>obr. 3-12: Princip podpory napětí sítě zkratovým proudem nesynchronními VM [47].....</i>	<i>62</i>
<i>obr. 3-13: Požadovaná frekvenční odezva P u VM v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci. [47]</i>	<i>64</i>
<i>obr. 3-14: Maximální snížení činného výkonu s klesající frekvencí [47].....</i>	<i>65</i>
<i>obr. 3-15: Frekvenční odezva činného výkonu na podfrekvenci u akumulačního zařízení [47]....</i>	<i>66</i>
<i>obr. 3-16: Charakteristika funkce $P(U)$ [47]</i>	<i>66</i>
<i>obr. 3-17: Charakteristika funkce $Q(U)$ [47].....</i>	<i>68</i>
<i>obr. 3-18: Schopnost frekvenční odezvy činného výkonu u výrobních modulů ve frekvenčně závislém režimu ilustrující případ bez pásma necitlivosti a bez necitlivosti [1].....</i>	<i>70</i>
<i>obr. 3-19: Příklad průběhů funkce frekvenční odezvy činného výkonu</i>	<i>71</i>

<i>obr. 3-20: FRT křivka pro SVM kategorie A1, A2 a B1 dle [50]</i>	83
<i>obr. 3-21: FRT křivka pro SVM kategorie B2 a C dle [50]</i>	84
<i>obr. 3-22: FRT křivka pro SVM kategorie D dle [50]</i>	84
<i>obr. 3-23: FRT křivka pro SVM kategorie A, B a C dle [50]</i>	85
<i>obr. 3-24: FRT křivka pro SVM kategorie D dle [50]</i>	85
<i>obr. 3-25: Diagram dodávky Q při maximální dodávce P pro SVM dle [50]</i>	86
<i>obr. 3-26: Diagram dodávky Q při maximální dodávce P pro NVM dle [50]</i>	87
<i>obr. 3-27: P-Q diagram dodávky Q při nižší než maximální dodávce P pro NVM dle [50]</i>	87
<i>obr. 3-28: Obecný fázorový diagram zdroje pracujícího do sítě</i>	94
<i>obr. 3-29: Schéma P-Q regulace [63]</i>	96
<i>obr. 3-30: Schéma U/f regulace [63]</i>	96
<i>obr. 3-31: Koncepce chránění bloku 10 MVA dle [22]</i>	101
<i>obr. 6-1: Grafické vyjádření rovnic 6.1 a 6.2</i>	114
<i>obr. 6-2: Ilustrace úrovní detailu modelu jedné větve měniče</i>	117
<i>obr. 6-3: Základní členění uživatelského rozhraní prvku v programu PSCAD</i>	122
<i>obr. 6-4: Prvky měření napětí a proudu</i>	124
<i>obr. 6-5: Prvky měření frekvence</i>	124
<i>obr. 9-1: Ilustrace možností regulace činného výkonu v závislosti na frekvenci</i>	141
<i>obr. 9-2: Základní architektura modelů zdrojů</i>	154
<i>obr. 9-3: Architektura modelu agenta</i>	158
<i>obr. 9-4: Architektura modelu sítě</i>	159
<i>obr. 9-5: Architektura modelu komunikační ústředny</i>	159
<i>obr. 9-6: Architektura modelu FRT</i>	160
<i>obr. 10-1: Rozvržení pracovního plátna modulů v programu PSCAD</i>	162
<i>obr. 10-2: Základní struktura modelu napěťového zdroje (U), měničového zdroje (IBG) a synchronního zdroje (SG)</i>	164
<i>obr. 10-3: Schéma silové části modulu samotného zdroje U</i>	164
<i>obr. 10-4: Algoritmus volby a výpočtu vnitřní impedance zdroje</i>	165
<i>obr. 10-5: Schéma silové části modulu samotného zdroje IBG</i>	166
<i>obr. 10-6: Schéma algoritmu generování spínacích pulzů střídače</i>	166
<i>obr. 10-7: Schéma modulu samotného zdroje SG</i>	168
<i>obr. 10-8: Schéma modulu měření VM</i>	170
<i>obr. 10-9: Schéma nadstavbové části testovacího modulu měření VM</i>	173
<i>obr. 10-10: Schéma funkce F21, část vstupů</i>	175

<i>obr. 10-11: Schéma funkce F21, část výstupů.....</i>	<i>176</i>
<i>obr. 10-12: Schéma funkce F01 – zpracování nominálního a požadovaného P.....</i>	<i>178</i>
<i>obr. 10-13: Schéma funkce F11 – $P = f(f)$</i>	<i>179</i>
<i>obr. 10-14: Ilustrace výstupů algoritmů funkce F11.....</i>	<i>181</i>
<i>obr. 10-15: Schéma funkce F12 – $P = f(f^-)$</i>	<i>183</i>
<i>obr. 10-16: Ilustrace výstupu algoritmu funkce F12.....</i>	<i>185</i>
<i>obr. 10-17: Schéma funkce F13 – $P = f(f^+)$.....</i>	<i>186</i>
<i>obr. 10-18: Ilustrace výstupu algoritmu funkce F13.....</i>	<i>188</i>
<i>obr. 10-19: Schéma funkce F14 – $P = f(U)$.....</i>	<i>190</i>
<i>obr. 10-20: Schéma funkce F15 – $Q = f(P)$.....</i>	<i>191</i>
<i>obr. 10-21: Schéma funkce F16 – $Q = f(U)$</i>	<i>193</i>
<i>obr. 10-22: Schéma funkce F17 – Rychlý poruchový proud</i>	<i>195</i>
<i>obr. 10-23: Schéma funkce F18 – Umělá setrvačnost.....</i>	<i>196</i>
<i>obr. 10-24: Schéma funkce výběru a ramp požadovaných P a Q</i>	<i>197</i>
<i>obr. 10-25: Schéma funkce F03 – Volič módů</i>	<i>201</i>
<i>obr. 10-26: Schéma funkce F04 – Řízení IBG - slave</i>	<i>203</i>
<i>obr. 10-27: Schéma funkce F05 – Řízení IBG - master – obvod napětí.....</i>	<i>204</i>
<i>obr. 10-28: Schéma funkce F06 – Řízení IBG - master – obvod frekvence</i>	<i>206</i>
<i>obr. 10-29: Schéma obvodů tvorby fáze posuvu a mezi frekvence</i>	<i>207</i>
<i>obr. 10-30: Grafika a návaznosti funkce F08 – Parametry RO – IBG</i>	<i>209</i>
<i>obr. 10-31: Schéma funkce F10 – Požadované napětí střídače</i>	<i>210</i>
<i>obr. 10-32: Schéma funkce F07 – Řízení SG.....</i>	<i>212</i>
<i>obr. 10-33: Grafika a návaznosti funkce F09 – Parametry RO – SG</i>	<i>214</i>
<i>obr. 10-34: Schéma funkce F22</i>	<i>216</i>
<i>obr. 10-35: Schéma funkce O01 – ANSI 27.....</i>	<i>216</i>
<i>obr. 10-36: Schéma funkce O03 – ANSI 81U.....</i>	<i>220</i>
<i>obr. 10-37: Schéma funkce O05 – ANSI 81R</i>	<i>222</i>
<i>obr. 10-38: Schéma funkce F19 – Fázovací podmínky</i>	<i>224</i>
<i>obr. 10-39: Schéma funkce F20 – Synchronizační logika.....</i>	<i>225</i>
<i>obr. 10-40: Základní struktura modelu agenta</i>	<i>227</i>
<i>obr. 10-41: Schéma silové části modulu vypínače agenta</i>	<i>227</i>
<i>obr. 10-42: Schéma funkce F40 – Povely a blokády vypínače.....</i>	<i>229</i>
<i>obr. 10-43: Schéma modulu měření agenta</i>	<i>231</i>
<i>obr. 10-44: Schéma funkce F42 – Vnější komunikace agenta – část vstupů.....</i>	<i>232</i>

<i>obr. 10-45: Schéma funkce F42 – Vnější komunikace agenta – část výstupů.....</i>	<i>233</i>
<i>obr. 10-46: Schéma funkce O06 – ANSI 50.....</i>	<i>234</i>
<i>obr. 10-47: Schéma funkce F41 – Fázovací podmínky agenta</i>	<i>236</i>
<i>obr. 10-48: Grafická podoba modelu sítě</i>	<i>237</i>
<i>obr. 10-49: Schéma silové části modelu sítě</i>	<i>238</i>
<i>obr. 10-50: Schéma funkční části modelu zdroje</i>	<i>238</i>
<i>obr. 10-51: Grafika modelu FRT</i>	<i>241</i>
<i>obr. 11-1: Časový průběh simulovaných skokových změn frekvence pro LFSM-O [50]</i>	<i>245</i>
<i>obr. 11-2: Časový průběh simulované plynulé změny frekvence pro LFSM-O [50]</i>	<i>246</i>
<i>obr. 11-3: SMe01U – test 1/1</i>	<i>248</i>
<i>obr. 11-4: SMe01U – test 1/2</i>	<i>248</i>
<i>obr. 11-5: SMe01U – test 2/1</i>	<i>249</i>
<i>obr. 11-6: SMe01U – test 2/2</i>	<i>249</i>
<i>obr. 11-7: Časový průběh simulovaných skokových změn frekvence pro LFSM-U [50].....</i>	<i>250</i>
<i>obr. 11-8: Časový průběh simulované plynulé změny frekvence pro LFSM-U [50]</i>	<i>252</i>
<i>obr. 11-9: SMe02U – test 1/1</i>	<i>254</i>
<i>obr. 11-10: SMe02U – test 1/2</i>	<i>254</i>
<i>obr. 11-11: SMe02U – test 2/1</i>	<i>255</i>
<i>obr. 11-12: SMe02U – test 2/2</i>	<i>255</i>
<i>obr. 11-13: Časový průběh simulované skokové změny frekvence a požadované frekvenční odezvy činného výkonu [50].....</i>	<i>256</i>
<i>obr. 11-14: Časový průběh simulované skokové změny frekvence a požadované [50]</i>	<i>257</i>
<i>obr. 11-15: Časový průběh frekvenční odezvy činného výkonu [50]</i>	<i>257</i>
<i>obr. 11-16: Časový průběh simulované plynulé změny frekvence [50]</i>	<i>259</i>
<i>obr. 11-17: Uvolňování ΔP_1 pro různé hodnoty S_1 [50]</i>	<i>259</i>
<i>obr. 11-18: Časový průběh simulovaných skokových změn frekvence [50].....</i>	<i>260</i>
<i>obr. 11-19: SMe03U – test 1/1</i>	<i>262</i>
<i>obr. 11-20: SMe03U – test 1/2</i>	<i>263</i>
<i>obr. 11-21: SMe03U – test 2/1</i>	<i>263</i>
<i>obr. 11-22: SMe03U – test 2/2</i>	<i>264</i>
<i>obr. 11-23: SMe03U – testy 2/3a, 2/3b a 2/3c</i>	<i>264</i>
<i>obr. 11-24: SMe03U – test 3/1</i>	<i>265</i>
<i>obr. 11-25: SMe03U – test 3/2</i>	<i>265</i>
<i>obr. 11-26: SMe04U – test 1a, 1b a 1c</i>	<i>268</i>

<i>obr. 11-27: SMe04U – test 1d, 1e a 1f</i>	269
<i>obr. 11-28: SMe04U – test 1g, 1h a 1i</i>	270
<i>obr. 11-29: SMe04U – test 1f</i>	271
<i>obr. 11-30: Časový průběh simulované změny frekvence pro simulaci ostrovního provozu [50]</i>	272
<i>obr. 11-31: Časový průběh simulované změny frekvence pro simulaci ostrovního provozu [50]</i>	273
<i>obr. 11-32: SMe06U – test 1/1a, 1/1b a 1/1c</i>	275
<i>obr. 11-33: SMe06U – test 1/2a, 1/2b a 1/2c</i>	276
<i>obr. 11-34: Časový průběh simulované změny žádané hodnoty jalového výkonu</i>	278
<i>obr. 11-35: SMe07U – test 1/1a ($U_p = 0,875 U_n$)</i>	279
<i>obr. 11-36: SMe07U – test 1/1b ($U_p = U_n$)</i>	279
<i>obr. 11-37: SMe07U – test 1/1c ($U_p = 1,1 U_n$)</i>	280
<i>obr. 11-38: SMe07U – test 1/2a ($U_p = 0,875 U_n$)</i>	280
<i>obr. 11-39: SMe07U – test 1/3a ($U_p = 0,875 U_n$)</i>	281
<i>obr. 11-40: Časový průběh simulované změny napětí pro FFC [50]</i>	282
<i>obr. 11-41: SMe08U – test 1a</i>	284
<i>obr. 11-42: SMe08U – test 1b</i>	285
<i>obr. 11-43: SMe08U – test 1c</i>	286
<i>obr. 11-44: SMe08U – test 1d</i>	287
<i>obr. 11-45: SMe08U – test 1e</i>	288
<i>obr. 11-46: SMe08U – test 1f</i>	289
<i>obr. 11-47: Časový průběh simulované plynulé změny frekvence pro simulaci umělé setrvačnosti [50]</i>	291
<i>obr. 11-48: SMe09U – test 1a</i>	292
<i>obr. 11-49: SMe09U – test 1b</i>	293
<i>obr. 11-50: SMe09U – test 1c</i>	293
<i>obr. 11-51: SMe09U – test 1d</i>	294
<i>obr. 11-52: SMe09U – test 1e</i>	294
<i>obr. 11-53: SMe09U – test 1f</i>	295
<i>obr. 11-54: Schéma testovací sítě funkcí PQU charakteristik</i>	296
<i>obr. 11-55: Grafické znázornění nastavení $Q(U)$ regulace měničového zdroje</i>	297
<i>obr. 11-56: Výstupy měničového zdroje s $Q(U)$ regulací</i>	297
<i>obr. 11-57: Grafické znázornění nastavení $Q(P)$ regulace napěťového zdroje</i>	298
<i>obr. 11-58: Výstupy napěťového zdroje s $Q(P)$ regulací</i>	298

<i>obr. 11-59: Grafické znázornění nastavení $Q(P)$ (vlevo) a $P(U)$ (vpravo) regulace synchronního generátoru</i>	<i>299</i>
<i>obr. 11-60: Výstupy synchronního generátoru s $P(U)$ a $Q(P)$ regulací.....</i>	<i>299</i>
<i>obr. 11-61: Schéma testovací sítě funkcí PQU charakteristik</i>	<i>300</i>
<i>obr. 11-62: Půběhy simulace $SMAS.pscx$.....</i>	<i>302</i>
<i>obr. 11-63: Půběhy simulace $SMAS.pscx$ – detail.....</i>	<i>303</i>
<i>obr. 11-64: Změny frekvence základního signálu, bez harmonických složek.....</i>	<i>307</i>
<i>obr. 11-65: Změny frekvence základního signálu, s harmonickými složkami</i>	<i>308</i>
<i>obr. 11-66: Změna poměru harmonické složky z nezkresleného signálu</i>	<i>309</i>
<i>obr. 11-67: Změna poměru harmonické složky ze zkresleného signálu</i>	<i>309</i>

SEZNAM TABULEK

<i>tab. 2-1: Výhledové scénáře dokumentů Scenario Storylines</i>	<i>24</i>
<i>tab. 2-2: Predikce dostupnosti akumulace elektrické energie podle MAF CZ.....</i>	<i>26</i>
<i>tab. 2-3: Predikovaný energetický mix ČR v roce 2040 podle MAF CZ.....</i>	<i>27</i>
<i>tab. 3-1: Požadavky na výrobní moduly dle PPDS</i>	<i>51</i>
<i>tab. 3-2: Přehled členění RfG s vazbou na PPDS.....</i>	<i>52</i>
<i>tab. 3-3: Parametry pro frekvenční odezvu činného výkonu ve frekvenčně závislém režimu [1] ..</i>	<i>70</i>
<i>tab. 3-4: Přehled zkoušek souladu dle RfG</i>	<i>74</i>
<i>tab. 3-5: Doporučené minimální velikosti frekvenční odezvy a odpovídající hodnoty statiky pro FSM dle maximální kapacity VM</i>	<i>82</i>
<i>tab. 3-6: Parametry FRT křivky pro SVM kategorie A1, A2 a B1 dle [50]</i>	<i>83</i>
<i>tab. 3-7: Parametry FRT křivky pro SVM kategorie B2 a C dle [50].....</i>	<i>83</i>
<i>tab. 3-8: Parametry FRT křivky pro SVM kategorie D dle [50].....</i>	<i>84</i>
<i>tab. 3-9: Parametry FRT křivky pro NVM kategorie A, B a C dle [50].....</i>	<i>84</i>
<i>tab. 3-10: Parametry FRT křivky pro SVM kategorie D dle [50].....</i>	<i>85</i>
<i>tab. 3-11: Chránění alternátorů dle ČSN 33 3051.....</i>	<i>98</i>
<i>tab. 3-12: Ochrany generátorů v sítích vn</i>	<i>99</i>
<i>tab. 3-13: Ochrany výroben s fázovými proudy do 16 A dle [51].....</i>	<i>99</i>
<i>tab. 3-14: Ochrany rozpadového místa výroben s moduly (VM (A2), B1, B2, C) dle [51].....</i>	<i>100</i>
<i>tab. 5-1: Přehled souboru norem IEC 61850.....</i>	<i>111</i>
<i>tab. 6-1: Maximální výpočetní krok simulace pro danou frekvenci a počet harmonických.....</i>	<i>124</i>
<i>tab. 9-1: Rozčlenění vlastností modelu zdroje.....</i>	<i>136</i>
<i>tab. 9-2: Rozčlenění vlastností modelu agenta.....</i>	<i>156</i>
<i>tab. 10-1: Základní návaznosti modulů modelů zdrojů.....</i>	<i>163</i>
<i>tab. 10-2: Externí vstupní a výstupní signály modelu VM</i>	<i>174</i>
<i>tab. 10-3: Základní návaznosti modulů modelu agenta</i>	<i>227</i>
<i>tab. 10-4: Externí vstupní a výstupní signály modelu agenta</i>	<i>232</i>
<i>tab. 11-1: Přehled validačních simulací</i>	<i>243</i>
<i>tab. 11-2: Mezní hodnoty pro test 2/3 frekvenčně závislého režimu</i>	<i>261</i>
<i>tab. 11-3: Kombinace výchozích a žádaných hodnot činného a jalového výkonu pro simulace schopnosti VM překlenout poruchu.....</i>	<i>267</i>
<i>tab. 11-4: Rozdělení simulací a mezní hodnoty jalového výkonu pro simulace schopnosti dodávat jalový výkon.....</i>	<i>278</i>

<i>tab. 11-5: Kombinace výchozích a žádaných hodnot činného a jalového výkonu pro simulace schopnosti dodávky rychlého poruchového proudu</i>	<i>283</i>
<i>tab. 11-6: Kombinace výchozích a žádaných hodnot činného a jalového výkonu pro simulace schopnosti dodávky rychlého poruchového proudu</i>	<i>292</i>
<i>tab. 11-7: Relativní chyba určení THD při různém výpočtovém kroku simulace</i>	<i>305</i>
<i>tab. 11-8: Srovnání výpočtového času pro varianty měření frekvence v rámci programu PSCAD</i>	<i>311</i>

1 ÚVOD

Elektroenergetika je obor lidské činnosti, který se neustále vyvíjí. Jako i u ostatních oborů, které tempem naší civilizace prochází neustálým vývojem, je i energetika nucena přizpůsobovat se novým trendům, technologiím a specifickým zájmům a požadavkům společnosti. V posledním desetiletí je nejsignifikantnějším trendem transformace elektroenergetiky od té „klasické“¹ směrem k distribuované. Proces se dá ekvivalentně nazvat také jako přechod k obnovitelným zdrojům elektrické energie (OZE; Renewable Energy Sources – RES), ač se nejedná o totožnou věc. Ač konkrétně tyto zdroje nemusí mít charakter malých zdrojů instalovaných různě v síti, je s OZE spojována problematika tzv. rozptýlené/distribuované výroby (Distributed Energy Resources – DER). Implementace velkého množství zdrojů menších výkonů do různých napěťových hladin (úrovní) elektrizační soustavy (ES) sebou přináší řadu výzev, které je nutné zkoumat a řešit jak na úrovni agendy provozovatele distribuční soustavy (PDS; Distribution System Operator – DSO) tak na úrovni provozovatele přenosové soustavy (PPS; Transmission System Operator – TSO).

Současné tempo implementace DER přináší otázky ohledně funkčních schopností těchto zdrojů, jejich vazby a vlivu na síť a jejich chování a odezvy při různých stavech a dějích v síti. Pohledem z druhé strany (ze strany sítě) pak dochází ke změnám stability a dynamických výkonových charakteristik energetického systému (s dopady na systémy elektrických ochranných sítí a různé další aspekty kvality elektrické energie). Tím roste poptávka po prostředcích, které by dokázaly správně interpretovat různé charakteristiky, chování a nastavení různých typů zdrojů atd.

Moderním trendem v mnoha oborech lidské činnosti je snaha o využití modelu konkrétního systému. Model, ať už fyzický nebo výpočetní (softwarový), je dobrou možností, jak často s řádově nižšími finančními náklady ověřit funkčnost daného systému. Počítačové simulace otevírají široké možnosti určitého druhu testování. Počítačové modelování a následné simulace/výpočty v oboru elektroenergetiky mohou značně urychlit velké množství projektantských výpočtů a odhalit spoustu nesrovnalostí s teoretickými předpoklady. Možnosti současných programů, zaměřujících se na modelování a simulace v oblasti elektrotechniky jdou o kus dál, daleko za reálné možnosti projektantských výpočtů. S ohledem na dynamiku elektroenergetických systémů má uplatnění počítačových simulací v době, kdy existuje dostatečný fyzikální popis dějů probíhajících v reálném provozu sítě, obrovský potenciál. Trend zvyšujícího se podílu softwarové výpomoci lze sledovat u převážného množství firem a společností zabývajících se oborem elektroenergetiky. S rostoucím výpočetním výkonem pracovních stanic zároveň rostou možnosti modelovat a simulovat systémy více detailněji, přesněji a rozsáhleji.

V praxi chybí dostatečně ověřené a robustní modely pro potřeby dynamických simulací, které by dokázaly co nejpřesněji interpretovat chování skutečných zdrojů, a se kterými by bylo možné zkoumat různé děje a chování systému jako takového. Toto není jediný důvod potřeby kvalitních modelů zdrojů a dalších prvků ES. Ruku v ruce s implementací jdou také legislativní požadavky na nově instalované zdroje. Na základě mnoha studií a hodnocení reálných provozů jsou stanovovány různé legislativní požadavky na nové i současné zdroje. Zde se opět nabízí možnost využití modelů. Nařízení Komise (EU) 2016/631 [1] dokonce uvažuje s existencí modelů zdrojů elektrické energie jako prostředku pro ověřování vlastností nově instalovaných zdrojů. S tím do velké míry souvisí jedna z nejzávažnějších výzev měnící se struktury ES – problémy, které sebou

¹ Klasickou energetikou lze zjednodušeně nazvat takovou strukturu elektroenergetiky, kdy majoritními zdroji v soustavě jsou zdroje se synchronními generátory o výkonech stovek megawattů pracující do PS; struktura, kde výkonové toky směřují zpravidla od vyšších napěťových hladin k těm nižším.

přináší zvyšující se podíl zdrojů dodávajících výkon do sítě skrze výkonové měniče, které jsou právě vazbou mezi zdrojem a sítí u fotovoltaických zdrojů, některých typů větrných elektráren, dalších malých zdrojů, bateriových systémů atd. Problematika chování těchto měničových zdrojů je součástí popisu kapitol zabývajících se teorií, stejně tak, jak jsou zde popsány další relevantní návaznosti problematiky okolo modelování a simulací chování reálných elektroenergetických systémů.

Možnosti současného stavu technologií přináší také řadu možností jejich využití v elektroenergetice. Schopnosti komunikace mezi prvky elektrizační soustavy spolu s možností aplikace prvků inteligence, skrze algoritmy procesních jednotek příslušících daným zařízením, přináší široké možnosti uplatnění v rámci tzv. multiagentních systémů (MAS; Multi-Agent System).

1.1 Motivace

Motivace pro výběr zaměření této práce byla nalezena po úvahách o směru vývoje určitých segmentů elektroenergetiky jak po stránce technické, tak po stránce finanční a investiční. Vývoj určitých segmentů elektroenergetiky nabírá v posledních letech velké síly a pomyslně za sebou táhne další segmenty, bez nichž by však systém nemohl správně (spolehlivě a bezpečně) fungovat. Řeč může být například implementaci OZE. Tento segment energetiky nutí k rozvoji další segmenty, jako vývoj a implementaci bateriových a jiných akumulčních systémů, polovodičovou techniku (střídače a usměrňovače), automatizaci (např. řídicích systémy) a v neposlední řadě legislativu. Pomalejší vývoj oněch dalších segmentů pak brzdí vývoj, či spíše implementaci, těch silných. Není nutné zdůrazňovat, že důvodem rozvoje silných segmentů je v největší míře byznys a v menší pak enviromentalismus (za kterým se byznys často skrývá). Pro představu lze uvést konkrétní příklad: Vývoj na poli obnovitelných zdrojů energie a řešení mikro sítí je brzděn pomalejší reakcí rozvoje nadřazených sítí, ochran, právních předpisů atd. K tomuto konkrétnímu příkladu se odkazuje i tato práce. Není pravdou, že by se rozvojem těch „slabších“ segmentů nikdo nezabýval. Naopak, i v těchto oblastech dochází k velkému vývoji.

Možnosti a výzvy v oblasti řízení a provozování elektrických sítí jsou velké. Publikace, která by popisovala všechny aspekty tohoto tématu, v současné době neexistuje. Mnoho týmů se však touto problematikou zabývá a nachází spoustu částečných či komplexnějších řešení. Konkrétně, se současnou mírou implementování obnovitelných zdrojů energie (OZE) v mnoha energetických systémech po celém světě se zvyšuje i poptávka po vysoce kvalitních a validovaných dynamických modelech, které by dokázaly správně a spolehlivě interpretovat jejich výkonové charakteristiky a další funkce, které se uplatní v reálném provozu. V tomto ohledu shledávám výzvu a nacházím motivaci pro studium právě té problematiky, kterou se práce celkově zabývá.

2 ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA ČR

Elektrizační soustava lze např. podle kodexu PS [2] definovat jako: Vzájemně propojený soubor zařízení pro výrobu, přenos, transformaci a distribuci elektrické energie, včetně elektrických přípojek a přímých vedení, a systémy měřicí, ochranné, řídicí, zabezpečovací, informační a telekomunikační techniky. Je zřejmé, že tato definice zahrnuje i akumulární systémy a prvky chytrých sítí. Pro úplnost a další použitelnost, je nutné dodat další informace. Důležitým faktem je, že systém ES se rozděluje na přenosovou a distribuční (rozvodnou) síť. Odtud pojmy přenosová soustava (PS) a distribuční soustava (DS). To má důsledek především v použité topologii sítě a filozofii řízení provozu, stejně tak jako v systémech chránění.

Historie a vývoj

Pro pochopení konkrétního současného stavu struktury elektroenergetiky – zdrojová základna, systém řízení a regulace, topologie sítí, uzemňovací soustavy atd. je nutné studium historických souvislostí, díky kterým lze současný stav, kterým je třeba se zabývat, lépe pochopit a lépe na něj navázat v budoucím rozvoji. Publikace, které jsou vhodné pro splnění tohoto požadavku, mohou být např. knihy *Rozvoj energetiky Jižní Moravy* [3] a *Proměny české energetiky* [4]. První z uvedených knih se týká především rozvoje energetiky jižní Moravy od počátků elektrifikace do roku 1992. Jsou zde uvedeny faktické souvislosti technického charakteru, spolu s výčtem osobností české energetiky, které se zasloužili o daný progres. Druhá, novější kniha, vydána roku 2009, je obsáhlejší a zaměřená na energetiku celé ČR. Za významné části knihy považuji především kapitulu 1 – *Proměny energetiky v průběhu staletí*, kapitolu 2 – *Vývoj legislativy, řízení, organizace a výzkumu energetiky* a kapitolu 6 – *Inovace zařízení a technologií energetiky*, které spolu s ostatními kapitolami pokládají určitý informační základ – nutnou znalost historického vývoje. Podrobný výklad celé historie elektroenergetiky ČR by byla nad rámec této práce.

Dále, z webových stránek ERÚ (Energetického regulačního úřadu) [5] lze čerpat konkrétní a relevantní data o stavu elektrizační soustavy ČR – skladba zdrojů a jejich výroba, spotřeba netto a brutto atd. Opět by bylo nad rámec této práce uvádět zde konkrétní informace z tohoto zdroje informací.

Současnost

ES ČR byla od ranných dob své koncepční existence formována tak, aby výkon velkých síťových elektráren byl vyveden do PS. V současné době je aktuální stav ES ČR ovlivňován zejména postupným stárnutím parních technologií a tlakem na implementaci OZE na straně výroby a liberalizací trhu na straně spotřeby elektrické energie. Do vývoje ovlivňující současný stav lze samozřejmě zahrnout celou řadu dílčích parametrů, které se často snaží skrýt vidinu zisku malé či větší skupiny investorů. Popis současného konceptu řízení sítí je popsán v kapitole 2.3 (na straně 40).

Současný stav ES ČR se také vyznačuje celou řadou pilotních projektů, které mají za úkol vyzkoušet a ověřit implementaci nových síťových komponent a funkcí v rámci chytrých sítí. Problematika nových síťových komponent a inovativních možností řízení se prolíná kapitolami 3, 4 i 5.

Vývoj a budoucí stav

Téma vývoje ES musí být chápán jako vývoj elektroenergetiky jako celku, jako fungujícího systému. Samozřejmě, je nutné brát v potaz provázanost s dalšími obory jako je např. teplárenství.

Vývoj potřeb lidské společnosti, spolu s technickým pokrokem hrají v tomto ohledu také nezanedbatelnou roli. Prakticky lze očekávat určitý směr vývoje technologického řešení provozu elektrizačních soustav. Vývoj každého oboru lidské činnosti je často udáván relevantními subjekty, které na základě různých parametrů a různými nástroji usměrňují přirozený tržní vývoj daného oboru. Podobně je tomu i v oboru elektroenergetiky. Právě v souvislosti s elektroenergetikou, jako kompletně chápaným systémem s jasným vymezením, je použití pojmu tržní vývoj do určité míry zavádějící a některými odborníky v oboru brán na lehkou váhu s odůvodněním, že tak významný systém (jakým elektroenergetika, z důvodu uplatňování navyknutých potřeb obyvatel vyspělých zemí, národohospodářskou návazností a národní bezpečností atd. je) nelze řídit tržním principem.

Dle mého současného názoru je situace okolo otázky *kdo udává směr vývoje elektroenergetiky* (?) do velké míry nejednoznačná a komplikovaná. V každém rozhodnutí příslušných subjektů lze hledat konspiraci a zájmy různých skupin. (Pro příklad lze uvést fotovoltaický boom v ČR nebo zisky skupin disponujícími technologiemi konstrukce a řízení měničů, výrobců a dodavatelům FV panelů, VTE atd. po odklonění některých zemí od jaderné energetiky.) Lze jen spekulovat, do jaké míry mají různé zájmové skupiny vliv na oficiální stanoviska subjektů mající za úkol stanovit pomocí různých zákonů, regulací a koncepcí budoucí vývoj elektroenergetiky. Veřejnosti předkládaná oficiální stanoviska či výhledy tak mohou být do určité míry řízeny úplně jinými skupinami lidí, než jakými jsou veřejnosti prezentovány.

Vize či oficiální koncepce, stanoviska, dohody a trh určující vývoj elektroenergetiky jsou zatíženy chybou, která bude známa až s odstupem času. Jako autor této práce musím uvést, že jsem si vědom nutnosti vzniku většiny dokumentů „definujících budoucnost“, nicméně se plně neztotožňuji s jejich obsahem. Důvodem není skepse nad odborností autorů, ale pocit nejistoty při uvážení skutečné složitosti nejen samotného oboru elektroenergetiky a popřípadě energií obecně, ale i „fungování světa“ jako takového. Jsem přesvědčen o tom, že nikdo nemůže systém fungování světa globálně popsat s takovým nadhledem, který by zaručoval vysokou pravděpodobnost shody se skutečností. Při uvážení závislosti elektroenergetiky např. na ropě, či ceně a dostupnosti uhlí nebo plynu, kdy do hry vstupuje konjunkce závislosti na surovině i s jinými obory jako konkrétně v případě s ropou a uhlím s obory automobilového průmyslu, výroby strojů, teplárenství, hutního průmyslu a mnohými dalšími, je predikce „skutečné budoucnosti“ do velké míry nejistá. Nemluvě o nečekaných či těžko predikovatelných událostech, jako jsou, z historie známé, nehody jaderných elektráren, výkyvy cen komodit a akcií světových burz, války či mezinárodní konflikty nebo jen vůle účelně informovaného obyvatelstva (konkrétně např. vnímání jaderné energetiky: Rakušané vs. Češi). Stejně tak je možné zmínit další, relativně nové faktory, které mohou dle mého názoru fatálně znehodnotit současné predikce. Řeč může být například o technologiích baterií či akumulaci energie obecně (podobně jak tomu bylo při uvedení LED svítidel na trh). Nejenom současný pomalý, zato stálý vývoj, založený povětšinou na zlepšování současných technologií, ale především i možnost vzniku průlomového objevu nebo aplikace např. na poli akumulace energie nebo přeměny primární energie může přinést změnu současného paradigmatu pohledu na elektroenergetiku. Jsem si vědom, že objevy na poli technického vývoje mohou být ve velké míře ovlivňovány mocí zájmových skupin. Nemusí jít vždy o úplně „vymazání“ pokroku, ale o „pozdržení“, dokud současná technologie nepřestane přinášet požadovaný objem zisku. Samozřejmě je třeba brát v potaz, že některé zmíněné faktory se nemusí ve výrazné míře uplatnit, jestliže půjde o predikci typu energetické koncepce, ale naopak může zcela znehodnotit predikci typu teoretické vize.

Dokumenty s vazbou na budoucnost ES

Existuje celá řada dokumentů, která se do určité míry snaží predikovat vývoj ES jako celku nebo jako souboru určitých elementů. Pomyslně by se toto kvantum dokumentů dalo rozdělit podle několika kategorií. Jedním z hledisek je geografická oblast. Existují dokumenty s celosvětovým zaměřením, které jsou do velké míry méně závazné, přes kontinentální, jako např. evropské, kde konkrétně tyto mají mnohem větší váhu a jsou konkrétnější, až po státní či lokální, v rámci určité části soustavy. Dalším hlediskem je časové vymezení. Existují dokumenty, které popisují návaznosti na desítky let dopředu, přes desetileté a pětileté, až po roční. Zde je skoro pravidlem, že čím dlouhodobější zaměření dokumentu, tím více se jedná spíše o vizi či predikci než o závazek či povinnost. Dalším, důležitým hlediskem, je důležitost dokumentu, resp. jeho závaznost. Dokumenty, mající význam určité koncepce či ukládající povinnost přijmout určitý závazek, musí být brány a vnímány s vysokou mírou významu. Autory takových dokumentů jsou většinou speciální komise nebo týmy, kterým vznik těchto dokumentů udává za povinnost legislativa (pro ČR konkrétně buď ta evropská nebo přímo česká). A konečně také existuje hledisko toho, k jaké oblasti průmyslu se dokument váže. Jestli je zaměření čistě na elektroenergetiku nebo i na další oblasti lidské činnosti (kritická infrastruktura, teplárenství, zdrojová soběstačnost atd.)

TYNDP

V rámci ENTSO-E existuje System Development Committee (SDC) – komise pro rozvoj systému, která je autorem publikací důležitých pro další strany zúčastněné v celoevropské otázce rozvoje evropské elektrické rozvodné sítě (tvůrci zákonů, investoři, zástupci průmyslu, organizace spotřebitelů, nevládní organizace). SDC je zodpovědná za vznik výhledových zpráv a desetileté plány rozvoje ES – Ten-Year Network Development Plan (**TYNDP**). Na výkonnou zprávu TYNDP 2018 odkazuje [6]. Dokument je vydáván každé dva roky a je přijímán i Evropskou komisí jako závazný dokument pro výběr projektů společného zájmu s ohledem na zajištění funkčnosti elektroenergetických systémů. Nepřímo je tak přijímán všemi členskými státy jako závazný dokument.

Scenario Storylines

Návaznost na TYNDP mají dokumenty označované jako **Scenario Storylines**, které rozvádějí rozvoj sítě do roku 2050 ve více scénářích. Dokument Scenario Storylines [7] zavádí pojem tzv. centrální matice (Central Matrix), která ve velmi zjednodušené formě udává predikci vývoje aplikací technologií u konkrétních kategoriích. Konkrétní hodnocení je voleno s ohledem na závazky klimatických dohod. Přes několik postupných stupňů je cílem nízkouhlíková společnost, kdy by měly být emise v roce 2050 o 80 až 95 % nižší oproti roku 1990. V tab. 2-1 je uvedena zjednodušená podoba výhledů ve třech hlavních scénářích – *Národní trendy* (National Trends), *Globální ambice* (Global Ambition) a *Distribuovaná energie* (Distributed Energy) tak jak ji uvádí právě Final ENTOSs' TYNDP 2020 Scenario Storylines [7].

Scénář Národní trendy zohledňuje informace z návrhů národních energetických a klimatických plánů (National Energy and Climate Plans – NECP) a národních rozvojových plánů (National Development Plans – NDP). To samo osobně zajišťuje návaznost na snížení emisí. Tento scénář s vazbou na obor elektroenergetiky znamená potenciál v růstu výroby FVE a VTE na základě požadavku konkrétní národní politiky s tím, že výroba je více centralizovaná. Decentralizace je v tomto scénáři predikována pouze v míře, do které si mohou samotní obyvatelé dovolit instalovat vlastní zdroje a uložistiště. Tento scénář je také predikcí postupné instalace plynových zdrojů, které budou vytlačovat ty uhelné a do jisté míry i jaderné, a to spíše kvůli předpisům než kvůli ceně.

Scénář Globální ambice zohledňuje výhled, který je dán více centralizovanou energetikou, zejména využívající velké větrné parky na severu a velké solární parky na jihu Evropy. V tomto scénáři je predikováno, že nízkouhlíkové technologie jsou konkurenceschopné i bez dotací. Proto jsou hlavními uvažovanými zdroji FVE a VTE. Nové JE nejsou v tomto scénáři do velké míry stavěny kvůli nákladům a přijatelnosti, zatímco vyřazování stávajících jaderných bloků z provozu se řídí vnitrostátními politikami. Výroba elektrické energie pomocí spalování plynu nahrazuje uhelné elektrárny kvůli efektivnímu celosvětovému obchodování s emisemi v krátkodobém a střednědobém horizontu a poskytuje nezbytnou flexibilitu pro vyvážení OZE v dlouhodobém horizontu. V dlouhodobém horizontu je pak v tomto scénáři uvažováno o využití možností bateriových uložení a přeměně elektrické energie na plyn (tzv. Power-to-Gas – P2G technologie) jako hlavních technologiích, které dokážou vyvažovat OZE. Plyn je zde také využit v kogeneračních jednotkách v sítích dálkového vytápění.

Scénář Distribuovaná energie naopak zohledňuje výhled, který vidí potenciál v decentralizaci energetiky. V tomto scénáři je predikován silný růst podílu výroby elektrické energie z OZE, s vysokým podílem malých FVE. Díky tlaku výrobu z OZE, s cílem snižování celkových emisí, je v tomto scénáři také počítáno s velkou generací VTE. S decentralizací výroby také poroste podíl menších zdrojů a bateriových systémů. Velké plynové elektrárny budou hrát čím dál menší roli. Na začátku procesu by však měly právě plynové zdroje hrát důležitou roli při nahrazování a útlumu uhelných, a později i jaderných zdrojů. Výroba by měla být flexibilnější, s možností přerušované výroby, a umožňující optimalizaci řízení výroby a spotřeby elektrické a tepelné energie.

Zde je nutné si uvědomit, že žádný z posledních dvou scénářů nebude existovat absolutně, ale že se jejich úroveň implementace do určité míře překryje. Pro úplnost jsou v tab. 2-1 uvedeny i faktory z oboru teplárenství, které samozřejmě mají také vazbu na elektroenergetiku jako takovou. Data v tab. 2-1 byla převzata z [7].

tab. 2-1: Výhledové scénáře dokumentů Scenario Storylines

faktor		přehled scénáře 2050		
kategorie	položka	národní trendy	globální ambice	distribuovaná energie
primární mix	uhlí	---	---	---
	ropa	--	---	---
	jádro	--	--	---
	vodní	o	o	o
	geotermální	o	+	++
	biomasa	+	++	+++
	importovaný obnovitelný a dekarbonizovaný plyn	+	+++	+
	zemní plyn	-	--	---
	vítr na pobřeží	++	+++	+++
	vítr na moři	++	+++	++
	sluneční	++	++	+++
	vítr pro P2G ²	+	+	++
	solární pro P2G	+	+	+++
	dovezené zelené kapalné palivo	+	++	+
vysokoteplotní teplo	celková poptávka (veškerá energie)	o	-	-
	poptávka po el. en.	+	+	++
	poptávka po plynu	+	++	o
nízkooteplotní teplo	celková poptávka (veškerá energie)	-	--	--
	poptávka po el. en.	+	++	+++
	poptávka po plynu	-	-	--
doprava	celková poptávka	-	--	--
	poptávka po el. en.	+	++	+++
	poptávka po plynu	+	++	+
energie a osvětlení	poptávka po el. en.	o	-	-

Značení v tab. 2-1 je vztaženo k porovnání se současným stavem a je definováno následující legendou: --- – nebude dostupné; -- – snížení; - – mírná redukce; o – zůstane zhruba stabilní; + – nízký růst; ++ – střední růst; +++ – vysoký růst.

ENTSO-E MAF

Mimo TYNDP je SDC zodpovědný za další dokumenty. Důležitou roli v pohledu na budoucí vývoj ES jsou dokumenty s názvem Mid-term Adequacy Forecast (**MAF**). Účelem ENTSO-E MAF je hodnocení přiměřenosti skladby energetických zdrojů v rámci evropské propojené soustavy s výhledem na víc jak deset let dopředu. Výhled je založen na pravděpodobnostní analýze provedené pomocí složitých nástrojů pro modelování trhu. Jeho cílem je poskytnout zúčastněným stranám komplexní podporu při přijímání kvalifikovaných rozhodnutí. Dokument MAF 2018 je uveden v [8]. Při studiích zdrojové přiměřenosti je uvažována vzájemná závislost mezi různými

² **P2G** je označení pro tzv. Power-to-Gas technologii. Jde o přeměnu elektrické energie na energii vázanou v plynném médiu. Důvodem je obvykle snaha o snadnější/dostupnější možnosti skladování energie.

opatřeními, která mají dopad na přiměřenost zdrojů. V úvahu jsou brány obecně výrobní kapacita zdrojové základny (Generation capacity), možnosti odezvy na straně spotřeby (Demand-side response), energetická účinnost (Energy efficiency), možnosti akumulace (Storage), flexibilita (Flexibility), vzájemné propojení (Interconnection) a přiměřenost (Adequacy).

Na základě ENTSO-E MAF lze včas identifikovat blížící se potíže se zdrojovou základnou. Na dokument pak navazuje nařízení Evropského parlamentu a Rady 2019/943 o vnitřním trhu s elektrickou energií, který stanoví postup nápravných opatření tak, aby nedošlo k narušení regulačního rámce či dokonce selhání trhu.

Dokumenty MAF vznikají za spolupráce národních provozovatelů PS – v návaznosti na ČR tedy za spolupráce s ČEPS, a.s. Každá roční verze dokumentu MAF je rozdělena do tří částí. MAF 2018 je rozdělen na výkonnou zprávu a dva dodatky. Ve výkonné zprávě jsou popsány scénáře a hlavní výsledky hodnocení přiměřenosti pro roky 2020 a 2025 a citlivostní analýza na snižování emisí uhlíku pro rok 2025, což je nízkouhlíkový scénář, který simuluje a studuje vliv odstavování zdrojů spalujících fosilní paliva v důsledku environmentálních opatření v rámci legislativy. První dodatek [9] podrobněji popisuje studii MAF, vč. metodiky a předpokladů, popisu nástrojů pro modelování trhu používaných pro MAF 2018, podrobných výsledků různých studií, analýz úrovně exportu a importu v různých možných scénářích a analýz dopadu omezení a regulací vodohospodářských pravidel. Druhý dodatek obsahuje připomínky specifické pro danou zemi a příslušné odkazy na národní a regionální studie.

Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040 (MAF CZ)

Českou návazností na MAF je dokument **Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040 (MAF CZ)**, vydán 18.10.2019, uveden v [10], která má pro účely této práce konkrétnější návaznosti. Autorem studie je ČEPS a dokument je návazností na nařízení Evropského parlamentu, který členským státům udává povinnost sledovat přiměřenost výrobních kapacit na vnitrostátní i celoevropské úrovni. Studie provedené v rámci MAF CZ by měly být v souladu s metodickými doporučeními ENTSO-E.

Hlavním cílem vnitrostátního posouzení je pravidelně předkládat potvrzení uspokojivého stavu zdrojové přiměřenosti v ČR, případně včas určit možná budoucí rizika a identifikovat příčiny, které ke vzniku těchto rizik vedou. V návaznosti na identifikaci možných rizik by následně měl být zpracován prováděcí plán s harmonogramem pro přijetí nápravných opatření. Účelem implementace těchto nápravných opatření je odstranit veškerá zjištěná narušení regulačního rámce a selhání trhu. Pokud by se i tato opatření ukázala jako nedostatečná, může členský stát v souladu s Nařízením EP a Rady (EU) 2019/943 zvážit další kroky, jako je například zavedení kapacitních mechanismů. [10]

Dá se uvést, že výstupy, resp. informace uvedené v MAF CZ jsou pro budoucí strukturu sítě velmi signifikantní. To je dáno především návaznostmi na legislativu. Dá se také uvést, že výstupní informace MAF CZ mají potenciál stát se určitou bernou mincí při formování nových legislativních dokumentů ČR s návazností na energetiku. Řeč může být např. o novém Energetickém zákonu, podpoře chytrých sítí apod. Dokument je každoročně aktualizován, je prezentován odborné veřejnosti na konferencích a workshopech, které částečně fungují jako zpětná vazba.

Konkrétní nejdůležitější výstupy studie se dají shrnout v několika větách. V současné době neprobíhá výstavba žádného velkého zdroje (stovky MW), který by mohl začít vyrábět elektrickou energii před rokem 2030. Pro roky 2020 až 2022 je předpoklad odstavení některých PE (celkově cca 2000 MW, z důvodů zpřísnění emisních limit dle směrnice 2010/75/EU). Rozvoj zdrojové

základny je tak zatím uvažován pouze na úrovni decentrálních zdrojů menších výkonů. Provozovatel JE Temelín bude mít snahu prodloužit provoz obou bloků min. do roku 2040, resp. 2042, tedy o deset let od jejich projektované provozní životnosti. Podobně čtyři bloky JE Dukovany má v plánu jejich provozovatel provozovat do roku 2035 až 2037 s možností dalšího prodloužení provozu všech bloků do roku 2045 až 2047. Nicméně provozní životnost EDU byla již jednou prodloužena a je tedy otázkou, jaká bude její skutečná životnost. Instalovaný výkon FVE dosáhne v roce 2030 hodnoty necelých 5000 MW (oproti 2057 MW na konci roku 2018) – po letech stagnace tak lze očekávat růst instalovaného výkonu FVE. VTE by do stejného roku měly navýšit svůj instalovaný výkon na necelých 1000 MW (oproti 316 MW na konci roku 2018). Energetické využití biomasy by se mělo do roku 2030 navýšit o cca 20 % (na 454 MW), zatímco podíl instalovaného výkonu zdrojů využívajících bioplyn by měl do stejného roku klesnout o cca 40 % (na 263 MW). Procentně výrazný nárůst by mělo zaznamenat využití biologicky rozložitelného komunálního odpadu (BRKO), kde by se měl instalovaný výkon vyroben zvýšit na 59 MW (z 16 MW na konci roku 2018). Predikce využití biomasy, bioplynu a BRKO je v MAF CZ uvedeno s odkazem na predikce *Národního energeticko-klimatického plánu* (NEKP). Podstatný nárůst by měla zaznamenat oblast akumulace elektrické energie. V tab. 2-2 je uvedena predikce z MAF CZ, která používá data ze studie *Potenciál flexibility DECE a spotřeby vč. akumulace a elektromobility pro řízení ES ČR v prostředí SG* (vypracované v roce 2018 v rámci plnění opatření NAP SG) přepočtená podle předpokládaného vývoje OZE. Pro data uvedené v tab. 2-2 jsou uvažovány pouze stacionární zdroje větších výkonů (v řádu jednotek až desítek MW) a baterie, které jsou součástí FVE. Uvažovaná účinnost cyklu je 85 %.

tab. 2-2: Predikce dostupnosti akumulace elektrické energie podle MAF CZ

rok	2020	2025	2030
kapacita (MWh)	99	534	897
vstupní/výstupní výkon (MW)	50	270	453

Součástí MAF CZ je samozřejmě i vyhodnocení vývoje roční spotřeby ČR, která bere v úvahu faktory jako energetická náročnost, využití nových technologií při vytápění, klimatizace, akumulace a elektromobilita a bere v úvahu přirozené chování spotřeby, změny v její struktuře, hodinové průběhy a závislost na klimatických faktorech. Výsledkem jsou dva scénáře, které se od sebe liší předpoklady v klíčových faktorech. Jeden scénář – konzervativní, který počítá s průměrným růstem HDP, prosazením úsporných opatření v efektivitě spotřeby domácích spotřebičů a veřejného osvětlení a nízkou implementací elektromobility. Druhý scénář – progresivní, který počítá s vyšším růstem HDP, prosazením maximální míry opatření v efektivitě spotřeby domácích spotřebičů, prosazením modernějších technologií v efektivitě veřejného osvětlení, prosazením úsporných opatření v efektivitě motorů v průmyslu a vysokou implementací elektromobility. Pro další hodnocení je v MAF CZ použit konzervativní scénář, který počítá s téměř lineárním růstem netto spotřeby celkem o cca 10 TWh do roku 2040. Samotné hodnocení zdrojové přiměřenosti vychází ze základního scénáře, který je rozdělen do dvou citlivostních analýz – scénářů. První scénář je nízkouhlíkový a druhý počítá s omezeným výkonem JE. Důležitou informací je, že v obou výhledech se ČR stane do roku 2030 v oblasti elektroenergetiky importní zemí. Ještě důležitější informací je, že bude velmi narůstat požadavek na disponibilitu regulačního výkonu pro dodržování kritéria *N-1*, který by byl ještě umocněn v případě kombinace obou scénářů (nízkouhlíková budoucnost bez dvou bloků (ze čtyř) JE Dukovany v roce 2030).

Vývoj zdrojové základny se ponese ve znamení snižování výrobní kapacity konvenčních zdrojů, což platí i pro celou Evropu. Odtud dál to začíná být drobínek nepřehledné. Ve výhledu

stavu v roce 2040 byly v MAF CZ použity další dva scénáře. Oba vycházejí z předpokladů popsaných v předchozím odstavci. Scénář s označením 2040 - A předpokládá postupný odklon od uhelných elektráren, kdy je počítáno pouze s provozem modernizovaných provozů (Ledvice, Tušimice, Prunéřov II a teplárna Mělník) a tepláren. Scénář 2040 - B je uvažován s významným odstavováním uhelných elektráren, kdy v provozu zůstane pouze PE Ledvice a teplárny. V obou případech se nepočítá s provozem JE Dukovany. Predikované složení zdrojové základny ČR v roce 2040 dle MAF CZ je pro oba zmíněné scénáře uvedené v tab. 2-3. Zdrojová data tab. 2-3 jsou logicky čerpána z MAF CZ [10]. Hodnotu bilance v tab. 2-3 lze zhruba uvažovat jako hodnotu nutného celkového importu elektrické energie za rok. ČR se tak podle této predikce stane silně importní zemí.

tab. 2-3: Predikovaný energetický mix ČR v roce 2040 podle MAF CZ

		Scénář 2040 - A	Scénář 2040 - B
instalovaný výkon (MW)	JE	2137	2137
	uhlí	2038	607
	ostatní fosilní	1505	1505
	plyn	995	995
	OZE	7727	7727
	VE	2253	2253
	celkem	16655	15224
výroba (GWh)		57085	49535
spotřeba (GWh)		77986	77986
meziroční změna spotřeby (%)		0,72	0,72
bilance (GWh)		-22784	-30175

Závěrečným doporučením MAF CZ je apel na realizaci opatření na zajištění výkonové rovnováhy včetně zavedení určitých kapacitních mechanismů. Jedním z důvodů je vypočtená vysoká hodnota pravděpodobnostního ukazatele (indikátoru) LOLE (Loss of Load Expectation), který udává počet hodin (zpravidla za jeden rok), kdy je zatížení určité části ES (v tomto případě ČR) vyšší než předpokládaná výroba elektrické energie včetně importu v alespoň části hodiny. Maximální doporučené hodnoty LOLE jsou 3 až 6 h/rok. Výsledky výpočtů v rámci MAF CZ jsou 42 h v roce 2025, 256 h v roce 2030 a dokonce 678 h (scénář A), resp. 3622 h (scénář B) v roce 2040. Dále, plánovaný rozvoj decentrální výroby a OZE plně nenahradí ubývající kapacity PE a JE. S ohledem na vývoj zdrojových základů ostatních evropských zemí nelze při zajišťování dodávek spoléhat pouze na import. S tím souvisí problematika toho, že v ČR není realizována ani plánována výstavba většího zdroje (jednotky stovek MW instalovaného výkonu) do roku 2030.

Národní klimaticko-energetický plán (NEKP)

Na konci roku 2018 zahájilo MPO ČR vnější připomínkové řízení k *Návrhu vnitrostátního plánu v oblasti energetiky a klimatu*, což je právě označení pro NEKP. Nutnost existence tohoto dokumentu je vázaná na požadavky Nařízení o správě energetické unie, které je součástí Evropské legislativy. V NEKP mají členské státy informovat Evropskou komisi o příspěvku emisí skleníkových plynů, podílu OZE, energetické účinnosti a stavu PS. NEKP ČR vznikl kooperací MPO, Ministerstva životního prostředí, Ministerstva dopravy, Ministerstva financí, ČEPS, NET4GAS, OTE a dalších subjektů, které mají k této problematice vztah či návaznost. Je předpokladem, že ČR, jako vyspělá země a součást EU bude usilovat o snižování emisí skleníkových plynů. Lze tedy očekávat doporučení na implementaci bez- nebo nízko-emisních technologií v energetice.

Státní energetická koncepce ČR (SEK)

Text této podkapitoly se váže k dokumentu *Aktualizace státní energetické koncepce ČR* prosince 2014 [11]. SEK by měla sloužit jako opěrný dokument dlouhodobých vizí energetiky ČR v otázkách bezpečnosti dodávek energie, konkurenceschopnosti (energetiky a sociální přijatelnost) a udržitelnosti (udržitelný rozvoj) se samozřejmou návazností na spolehlivost a cenovou dostupnost při zásobování velkoodběratelů i maloodběratelů energií. Dokument [11] rozvádí problematiku nejistot ekonomického, politického a technologického vývoje a snaží se vymezit směr, kterým by se měla energetika ČR vydat. To je velmi důležité pro oblast investic do energetických soustav, kdy právě SEK má být jedním z pilířů pro obhájení investic různých subjektů do energetiky ČR.

SEK je obsáhlý dokument. Celou koncepcí se v různé míře prolíná návaznost na požadované strategické priority energetiky ČR – vyvážený energetický mix; bezpečnost, spolehlivost a robustnost možností dodávek energií; efektivitu využití dostupných tuzemských zdrojů; udržení přebytkové bilance ES ČR s dostatkem rezerv (viz kontrast s predikcemi MAF CZ); snaha o zvyšování energetické účinnosti; rozvoj infrastruktury, mezinárodní spolupráce a integrace trhů s elektrickou energií a plynem; podpora výzkumu, vývoje, inovací školství (s návazností nejen na základnu odborníků a generační obměnu, ale i určitou technickou inteligenci obyvatelstva); a posílení kritické infrastruktury v případech závislosti na externích dodávkách (ať už přímo elektrické energie nebo surovin a paliv).

V zaměření na problematiku elektrické energie, jako jednoho ze základních elementů energetické koncepce, je hodnocení současného stavu velice podobný tomu, který je v této práci uveden výše, v kapitole Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040 (MAF CZ). (To je zcela logické.) Dokument SEK navíc přináší např. i srovnání tzv. plných nákladů na výrobu elektrické energie ve formě finanční analýzy a podrobnější scénáře vývoje české energetiky. Důležitým doplňujícím dokumentem je *Doplňující analytický materiál k návrhu aktualizace Státní energetické koncepce* [12], které jsou doplňujícím analytickým materiálem SEK. Doplňující dokument je rozdělen na dvě části. První část – *Možné scénáře vývoje české energetiky* – seznamuje s výběrem scénářů, které jsou přijatelné v rámci plnění nastavených kritérií, a jejich hodnocení. Mimo Optimalizovaný scénář, který je vybrán i pro SEK, jsou zde dále popsány a vyhodnoceny Plynový scénář s omezenou energetickou soběstačností, Zelený scénář s omezenou energetickou soběstačností, Bezpečný a soběstačný scénář, Konvenční ekonomický scénář a Dekarbonizační scénář. Druhá část – *Ekonomická analýza návrhu Aktualizace státní energetické koncepce* – popisuje detailněji Optimalizovaný scénář, včetně studie dopadů na domácnosti, průmysl a další odvětví ekonomiky. Analýza je zpracována včetně popisu metodologie a základních předpokladů, vývoje cen energetických surovin, investičních a provozních nákladů, ekonomického vývoje hospodářství, analýzy nabídky a spotřeby elektrické energie a tepla atd.

Strategie SEK do roku 2040 je zajištění soběstačnosti ve výrobě elektrické energie, s využitím vyspělých konvenčních technologií s vysokou účinností, s narůstajícím podílem OZE a druhotných zdrojů. Jaderná energetika by měla převzít pomyslnou štafetu v roli základního stavebního kamene zdrojové základny po uhelných elektrárnách. Tento cíl však dle mého a tuším i každého logicky uvažujícího člověka nemůže být dosažen bez stavby a zprovoznění nového jaderného zdroje. V posílení role JE spolu s využitím jejich odpadního tepla je uvažováno se stavbou jednoho až dvou nových bloků, další prodloužení životnosti EDU a případná další výstavba v horizontu odstavování EDU. Transformace infrastruktury má umožnit integraci nových technologií ve výrobě, přepravě a spotřebě a obnovu zdrojové základny. Je plánován odklon od uhlí k různorodější

(a nízkouhlíkovější) struktura zdrojů, rozvoj OZE, které by měly být konkurenceschopné. V té stejné větě však SEK uvádí, že konkurenceschopný rozvoj OZE má probíhat s účinnou podporou státu v oblasti přístupu k síti, povolovacích procesů, podpory technologického vývoje a pilotních projektů a současně veřejné přijatelnosti rozvoje OZE s cílem dosažení jejich podílu na výrobě elektrické energie nejméně 18 %, zapojení OZE do řízení bilanční rovnováhy [11]. Dalšími přínosy s cílem dosažení uspokojivého stavu energetiky by mělo být lepší využití odpadů pro energetické účely, částečná obnova uhelných zdrojů, rozvoj zdrojů na zemní plyn, využití mikrokogenerace, udržení přebytkové bilance, zvýšený podíl KVET, pokles spotřeby kapalných paliv atd.

SEK má důležitou návaznost na další strategické dokumenty – akční plány, které ovlivní vývoj elektroenergetiky v ČR. (Tyto navazující dokumenty již nebudou v této práci dále rozebírány.) Jedná se o *Národní akční plán implementace inteligentních sítí*, *Národní akční plán čisté mobility*, *Národní akční plán energetické účinnosti*, *Národní akční plán ČR pro energii z obnovitelných zdrojů*, *Akční plán pro biomasu* a *Akční plán rozvoje jaderné energetiky v ČR*, *Národní akční plán implementace inteligentních sítí*. I tyto navazující dokumenty by měly svým způsobem určovat směr české energetiky.

Mimo zmíněné dokumenty existuje celá řada dalších dokumentů, pilotních projektů, roadmap, dohod atd. Jejich popis by přesahoval rámec popisné části této práce, nicméně v celkovém pojetí je potřeba hledat návaznosti i s projekty chytrých sítí, průmyslu 4.0, Web of Cells, elektromobility (vč. E-Highway) atp.

I přesto, že zaměření této práce má relativně úzké vymezení, dá se v jejím rámci rozvést úvahu o budoucím stavu sítě. Na otázku lze nahlížet z mnoha pohledů (spotřebitel – domácnost, spotřebitel – podnik, soběstačnost, dispečerské vs. autonomní řízení, propojení soustav, bezpečnost a zajištění dodávky, trh a obchod s elektrickou energií atd.) a mnoha úhlů (ekonomického, technického, environmentálního atd.). Bohužel lze s mírnou nadsázkou tvrdit, že v otázce budoucích a víceméně i aktuálních potřeb české elektroenergetiky neexistují dva lidé se stejným názorem. Spektrum a rozsah informací týkající se predikce stavu elektroenergetiky kdekoliv na světě vyžaduje nutné studium současného stavu, legislativy, různých dokumentů, informačních zdrojů atd. I přesto nemusí být zdaleka odhalena pravda stojící za současnou, ale i historickou a budoucí transformací energetiky. Existuje totiž spousta skupin s různými zájmy, vizemi, prostředky a motivacemi, jejichž činnost se prolíná navzájem na různých úrovních (výstavba zdrojů, legislativa, implementace nových postupů, zařízení a služeb, normy atd.). Může tak vznikat spousta domněnek a konspiračních teorií, které nelze nikde 100% ověřit, potvrdit či vyvrátit. Případem může lobby zahraničních ale i tuzemský uskupení, která brojí proti stavbě nových jaderných zdrojů, z důvodu jejich nebezpečnosti. Ve skutečnosti totiž může jít o zájmy konkurenčních výrobců, kteří se budou muset podělit o dodávku podílu elektrické energie, která v případě jejich úspěšného tažení nebude vyrobena v novém jaderném zdroji. Jde v podstatě o mnohamiliardový byznys, který motivuje účastníky k různým, někdy i neetickým praktikám.

Bylo by chybou, kdybych, jako autor této práce, neuvedl svůj současný názor a postoje k budoucímu elektroenergetickému systému: Za nejdůležitější považuji uvědomění a zvážení všech parametrů systému včetně jejich provázanosti a vazeb i s úvahou časového hlediska (z pohledu udržitelnosti). Systémy jako ochrany a komunikace nechme zatím stranou a zabývejme se prvně úvahou o naplňování potřeb. Začneme úvahu premisou – zjednodušeně: vyrábíme, protože spotřebováváme. Základním bodem tedy musí být úvaha o zdrojích a spotřebě. Konkrétně, vezmu-li v úvahu oblast ČR, je nutné zvážit současný stav zdrojů, jejich životnost, ekonomii provozu,

režimy provozu a další, které definují systém zdrojů – dostatek elektrické energie. Na druhé straně řetězce existuje spotřeba elektrické energie. Tu je nutné také správně definovat a pokusit se odhadnout její vývoj. Právě jistá nevyzpytatelnost vývoje na straně spotřeby má větší vliv na potřebu výroby, než je tomu naopak, a to díky tržnímu systému – cena elektrické energie. Dílčím závěrem je nutnost formace takové zdrojové základny, která bude schopna reagovat na měnící se charakter spotřeby. Jsem s myšlenkou, že je třeba mít možnost se kdykoliv osamostatnit od PS okolních zemí bez dopadu na provoz české přenosové a distribuční soustavy, mít dostatečnou základnu pro základní zatížení, kde by měla hrát roli především ekonomika výroby. K tomuto dílčímu cíli energetika víceméně směřuje implementací možností ostrovních provozů malých i větších celků. Zmíněná ekonomika provozu by měla hrát důležitější roli než např. ekologie provozu či environmentální zodpovědnost (- ovšem, do určité/únosné míry). Otevřenost měnící se struktury elektroenergetického systému jako autonomní, energeticky soběstačné domácnosti a podniky, akumulace elektrické energie z OZE, zapojování menších zdrojů, rozvoj elektromobility atd., je nutným předpokladem pro vznik vlastního know-how a rozvoj ekonomického potenciálu těchto výzev. Zde vstupují do úvahy další součásti systému, jako je přenos a rozvod elektrické energie, který musí být vždy spolehlivě zajištěn, systém ochrany, řízení a komunikace, které musí spolehlivě pracovat pro blaho dělnického lidu. V tomto odstavci neuvádím žádný převratný pohled na věc, jen uvádím úvahy, se kterými se ztotožňuji. Je třeba nebýt neofóbní vůči změnám a hledět na vývoj věcí jako na výzvu. Je nutné mít na paměti limitní podmínky a stavy, za kterých je spolehlivý provoz definován, zejména z pohledu řízení a regulace, s ohledem na autonomní inteligenci celého elektroenergetického systému budoucnosti.

Závěrečný odstavec této kapitoly může posloužit jako obhajoba volby tématu této práce. Pokud se bude vývoj provozování ES odkloňovat od historického paradigmatu, kdy bude docházet k odklonu od velkých systémových zdrojů směrem k distribuované výrobě a akumulaci, s možnostmi malých ostrovních systémů, pak je výhodné vlastnit nástroj, pomocí kterého lze snadno simulovat různé studie a koncepce. Právě tato úvaha stála za myšlenkou vytvořit dílo po hlavě se vrhající do oblasti počítačových simulací.

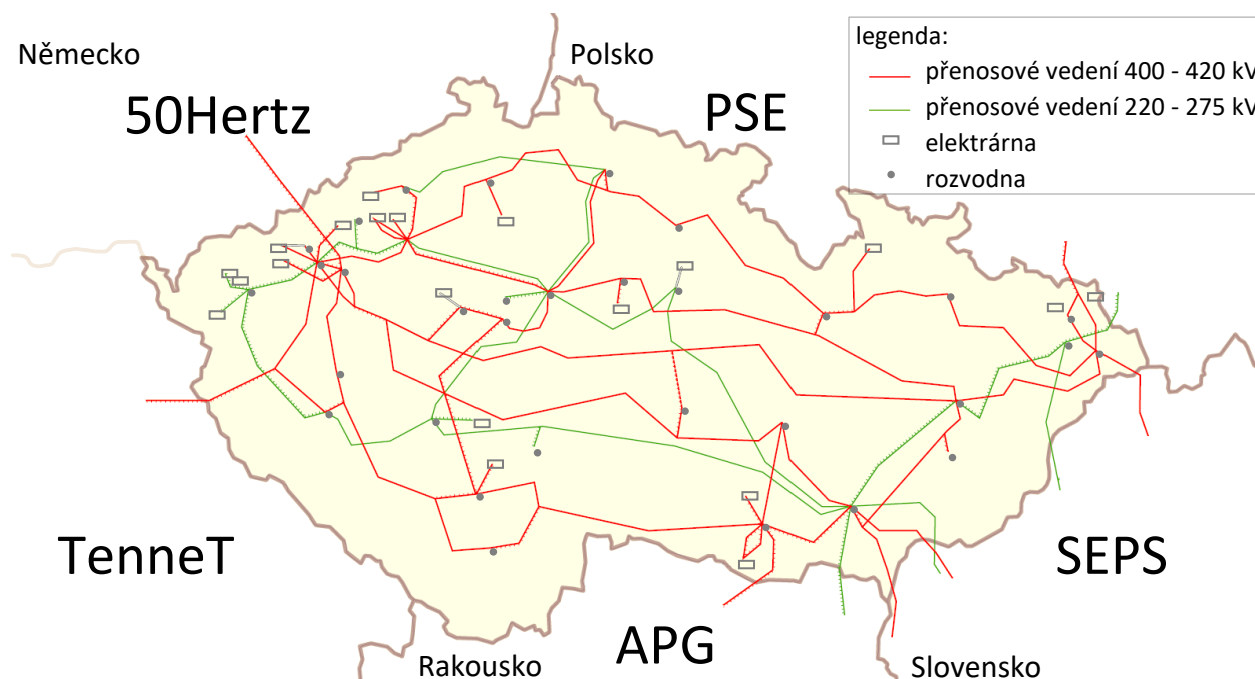
2.1 Přenosová soustava

V ČR spadají do PS podle části 7 kodexu PS [13] všechna vedení a zařízení 400 a 220 kV, některá vedení 110 kV, rozvodné stanice s transformátory 420 a 245 kV a kompenzační prostředky (tlumivky) instalované v těchto rozvodnách. Pravidla provozování PS jsou definovány v Kodexu PS, který je souborem stanovující minimální technické, konstrukční a provozní požadavky pro připojení a užívání přenosové soustavy, podmínky pro poskytování podpůrných a přenosových služeb a navazuje na Energetický zákon (458/2000 Sb. [14]), Pravidla provozování distribuční soustavy (PPDS) a nadnárodní dokumenty s vazbou na provozování celoevropské sítě.

Provozovatel PS (PPS) ČR je ČEPS, a. s. Hlavní činností ČEPS, a. s., je zajišťovat spolehlivý provoz a rozvoj přenosové soustavy nejen na území ČR, ale v kontextu mezinárodní spolupráce i v rámci propojených přenosových soustav. ČEPS, a. s., zajišťuje přenos elektrické energie mezi výrobcí a distributory, systémové a podpůrné služby, rovnováhu výroby a spotřeby, spolupracuje na přidělování přeshraniční kapacity formou aukcí. Společnost ČEPS přispívá k rozvoji trhu s elektrickou energií a podílí se na rozvoji evropského energetického trhu. [15]

V rámci evropské elektrizační soustavy sousedí česká PS se čtyřmi okolními státy, resp. pěti PPS – viz obr. 2-1. Pro více informací o spolupráci propojených přenosových soustav Evropy viz

webové stránky Evropské sítě provozovatelů přenosových soustav elektrické energie – ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) [16].

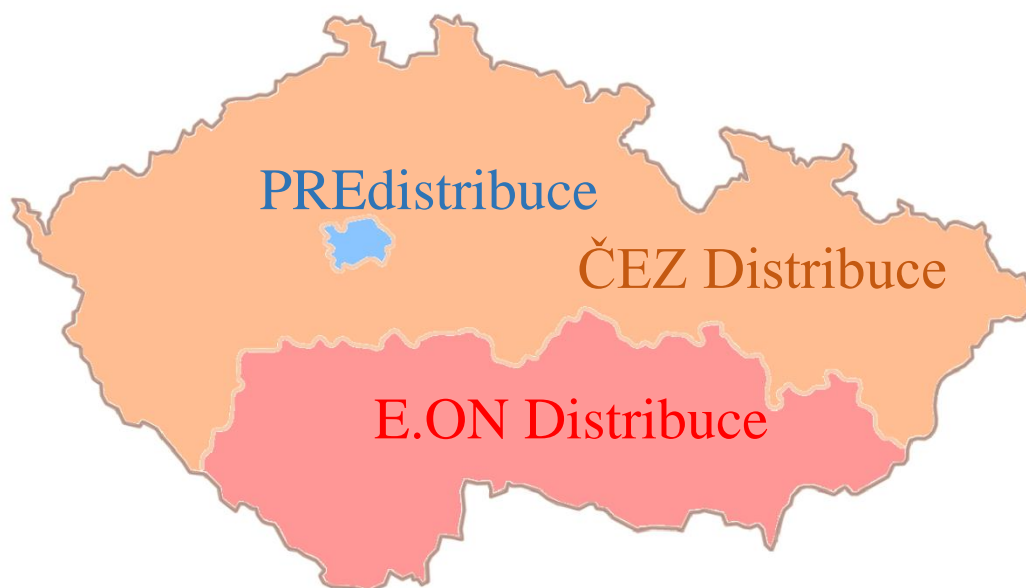


obr. 2-1: Zjednodušené schéma PS ČR, vč. návazností na okolní PPS

2.2 Distribuční soustava

Vzhledem k zaměření tématu práce je vhodné podrobněji popsat problematiku provozování DS. Většina informací této podkapitoly byla čerpána z [17] a Pravidel provozování distribuční soustavy (PPDS) [18]. V PPDS jsou také popsány některé odborné pojmy, které jsou uvedeny i v tomto textu. DS je podle PPDS [18] vzájemně propojený soubor vedení a zařízení 110 kV, s výjimkou vybraných vedení a zařízení o napětí 110 kV, která jsou součástí přenosové soustavy, a vedení a zařízení o napětí 0,4/0,23 kV, 1,5 kV, 3 kV, 6 kV, 10 kV, 22 kV, 25 kV nebo 35 kV, sloužící k zajištění distribuce elektrické energie na vymezeném území ČR, včetně systémů měřicí, ochranné, řídicí, zabezpečovací, informační a telekomunikační techniky včetně elektrických přípojek ve vlastnictví provozovatele DS (PDS). DS je zřizována a provozována ve veřejném zájmu. Předávacím místem mezi PS a DS je nízkonapěťová (nn) strana transformátoru PS.

PDS zajišťují různými prostředky provoz různých částí distribučních sítí. Mezi PDS, do jejichž kompetence spadá většina DS ČR patří ČEZ Distribuce, a. s., E.ON Distribuce, a. s. a PREdistribuce, a. s. Na obr. 2-2 jsou zobrazena geografická území těchto tří PDS. Mimo tyto PDS se na provozu DS minoritně podílejí i tzv. provozovatelé lokálních DS (PLDS), kteří mají na starosti vlastní, menší vymezené území a napěťovou úroveň v rámci lokální DS (LDS). Jedná se často o elektrickou síť nějakého podniku, průmyslové zóny, komerční zóny, obchodního centra či bytového komplexu.



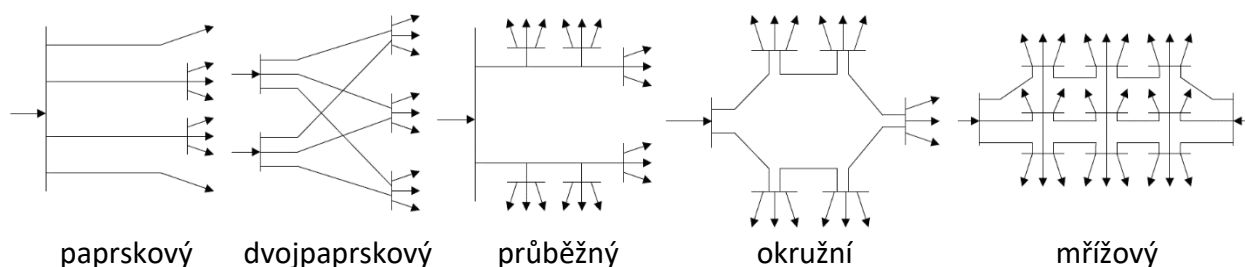
obr. 2-2: Přibližná mapa území PDS ČR

DS se provozuje na základě aktuálních PPDS [18] a dalších spjatých dokumentů jako jsou např. Energetický zákon, vyhlášky Ministerstva průmyslu a obchodu ČR (MPO), vyhlášky Energetického regulačního úřadu (ERÚ), Kodex PS, Pravidla provozování LDS (PPLDS) atd. Důležitým dokumentem je také Vyhláška o dispečerském řízení elektrizační soustavy a o předávání údajů pro dispečerské řízení – Vyhláška č. 79/2010 Sb. [19]. Tento dokument tvoří spolu s Kodexem PS a PPDS minimální soubor pravidel pro zajištění bezpečného a spolehlivého provozu DS.

PPDS se vztahují na subjekty s vazbou na DS jako jsou PDS, PPS, PLDS, provozovatelé připojení do DS, obchodníci s elektrickou energií, zákazníci – odběratelé. Dvě základní části PPDS se vztahují k plánovacím a připojovacím předpisům pro DS, resp. provozním předpisům pro DS.

2.2.1 Topologie DS

Elektrické sítě mohou být obecně řešeny dvojím způsobem. Prvním způsobem je tzv. otevřený rozvod, kde je spotřebič se zdrojem spojen jednou vodivou cestou. Představitelé tohoto řešení jsou např. paprskový nebo průběžný rozvod. Druhým způsobem je tzv. uzavřený rozvod, kde je spotřebič napájen vždy alespoň ze dvou míst. Představitelé tohoto řešení jsou např. okružní rozvod nebo mřížová síť. Topologie rozvodů elektrické sítě jsou obecně znázorněny na obr. 2-3. Volba topologického provedení, potažmo i volba provozní napěťové hladiny byla zvolena na základě spolehlivostních a ekonomických výpočtů.



obr. 2-3: Obecné typy topologie rozvodů (kresba převzata z [17])

Zatímco PS je řešena okružním rozvodem, provoz DS je řešen rozmanitějším způsobem. Základem DS jsou sítě 110 kV, které zajišťují předávání elektrické energie mezi PS (uzlové transformovny 400/110 kV nebo 220/110 kV) a zbytkem DS (transformovny 110/vn). Sítě 110 kV jsou provozovány nejčastěji jako okružní a tvoří tzv. uzlové oblasti 110 kV. DS vn jsou v dnešní době nejčastěji provozovány na napěťových hladinách 22 kV, případně 35 kV (oblast severních Čech) a topologicky jsou tyto sítě provozovány paprskovitě, případně průběžným rozvodem, ve městech je pak většinou možnost propojení do dvojpaprskového nebo okružního rozvodu.

Konkrétní architektura vn sítí se pak nejvýznamněji odlišuje v porovnání městských a venkovských sítí. U venkovských sítí pak hraje roli při porovnání jejich stáří. Nově budované se již zpravidla realizují kabelovými rozvody a vyšším zasmyčkováním pro zvýšení spolehlivosti dodávky v případě např. poruchy. Koncepce nově budovaných sítí vn zahrnuje úvahu nad zvyšujícím se podílem distribuovaných zdrojů (DER) připojících se do dané napěťové hladiny, očekávaný nárůst elektromobility a množství a velikost bateriových systémů.

2.2.2 Elementy ES

Především pro další popis modelovaných a simulovaných prvků a systémů je vhodné uvést a definovat určité rozdělení elektroenergetického systému v takové podobě, v jakém ho je třeba chápat pro vstupy a výstupy této práce. Obecně lze uvést, že prvním základním elementem elektroenergetického systému jsou **zdroje** elektrické energie, které musí dodat dostatek elektrického výkonu pro pokrytí příkonu druhého základního elementu – **spotřebičů** a pokrytí ztrát na přenosové trase mezi zdroji a spotřebiči. Pro zajištění předání elektrické energie mezi zdroji a spotřebiči musí existovat mimo **vedení** a **transformátorů** a definovaných parametrů elektrické energie také prostředky, které dokážou jak na straně výroby, tak i spotřeby zajistit požadovanou kvalitu elektrické energie. Řeč je o prvcích **řízení a regulace**, které se neváží pouze ke zdrojům a spotřebičům, nýbrž uplatňují se i v rámci řízení sítí, respektive řízení přenosu a distribuce. Tyto prvky mají za úkol udržovat konkrétní parametry fyzikálních veličin v tzv. *provozních limitách* – mezích, které jsou definovány pro bezpečný a spolehlivý provoz ES či technického zařízení. To vše se neobejde bez prvků **měření**, které jsou schopny dodat obsluze a samotným řídicím systémům potřebné informace o parametrech elektrické energie v různých časových výsečích a stavech různých zařízení s vazbou na elektroenergetický systém. Takto by elektroenergetický systém dokázal za určitých podmínek spolehlivě pracovat. Provozem elektrizační soustavy, vlivem člověka a působením přírodních podmínek však vznikají děje či stavy, které řídicí a regulační systémy nejsou schopny spolehlivě svou činností pokrýt. (Příkladem nepříznivého stavu způsobeného provozem může být například skokové odpojení velkého množství zdrojů či spotřeby; příkladem nepříznivého stavu způsobeného člověkem může být špatná dispečerská manipulace nebo špatný návrh zařízení vedoucí k provozní poruše; příkladem nepříznivého stavu způsobeného přírodními podmínkami může být přerušení vedení způsobené námrazou, úder blesku, pádem stromu atd.) Pro pokrytí dějů, při kterých sledovaný parametr opustí provozní limity a dostane se do oblasti tzv. *bezpečnostních limit*, musí existovat prvek **ochrany**, který musí při dosažení tzv. *limity ochrany* vykonat bezpečnostní zásah. Posledním prvkem elektroenergetického systému je prvek **kommunikace**, který zajišťuje přenos potřebné informace mezi jednotlivými prvky systému.

V následujících odstavcích jsou popsány prvky, kde hlubší úvaha a podrobnější informace nejsou relevantní vzhledem k problematice řešené v této práci nebo pro ně existuje samostatná kapitola dále v této práci. V podkapitolách v rámci této kapitoly jsou uvedeny informace, které jsou z teoretického hlediska důležité pro další návaznosti v rámci této práce. Mimo zde uvedené prvky lze v síti naléznout i další prvky jako například kompenzátory apod.

Existuje velké množství různých typů a provedení **zdrojů** elektrické energie. Na problematiku zdrojů elektrické energie je zaměřená i tato práce. Rozdělení a popis vlastností různých zdrojů je uveden v samostatné kapitole 3.

Problematika **řízení a regulací** z pohledu technického je důležitým prvkem zajišťující provoz ES. Problematika řízení ES je popsána v kapitole 2.3, zatímco problematice řízení zdrojů elektrické energie se věnuje kapitola 3.3.

Mezi důležité prvky ES a vlastnosti moderních elektrizačních soustav patří **komunikace**. Komunikaci lze chápat a vnímat z různých úhlů pohledu. V této práci, konkrétně v kapitole 5.5 je rozebrána problematika komunikací z hlediska relevantního k rozsahu této práce. Záměrně jsou tak v rámci modelů, které vznikly v rámci této práce opomenuty možnosti hromadného dálkového ovládání (HDO) či dispečerské povely, které však lze implementovat dalším uživatelským nastavením simulace. Cílem míry aplikace komunikace je totiž možnost implementace komunikace mezi určitými, automatizovanými prvky sítí, jako jsou přímo zdroje, agenti či integrovaná nadstavba reprezentující algoritmy chytré autonomní sítě. HDO a dispečerské povely je samozřejmě v rámci simulací možno imitovat provedením a nastavením simulace.

Spotřebičem lze obecně nazvat zařízení, které přeměňuje elektrickou energii na jiný druh energie. V rámci matematického popisu se dá každý spotřebič popsat sadou parametrů popisující náhradní obvod, pomocí něhož je umožněna interpretace a vlastnosti spotřebiče s ohledem na elektrickou síť. Spotřebiče se dají podle různých kritérií rozdělit do mnoha skupin. Pro účely této práce postačí základní popis problematiky spotřeby elektrické energie. Na základní důsledky činnosti spotřebičů, které jsou řešeny v rámci této práce, má vliv způsob připojení spotřebiče na síť – 1fázové vs. 3fázové. Obecně se dá uvést, že trojfázový spotřebič odebírá proud ze všech tří fází souměrně (to v reálné síti, vlivem napěťové nesymetrie nemusí platit). Jednofázový spotřebič pak svým odběrem elektrické energie obecně přispívá k napěťové nesymetrii dle funkce závislosti velikosti odběru a zkratovém výkonu v místě připojení spotřebiče. U obou těchto typů zdrojů pak lze uvážit, jestli odebírají pouze činnou část výkonu – činnou složku proudu (takové spotřebiče se nazývají čistě odporové) nebo i jalovou část (pak jsou takovéto spotřebiče označovány jako indukční nebo kapacitní). Posledním kritériem, které je třeba uvážit je, zdali spotřebič odebírá harmonický proud nebo ne. Zejména využívání prvků výkonové elektroniky vede právě k odběru neharmonického průběhu proudu, čímž je zpětně ovlivněna kvalita elektrické energie. Z pohledu provozu sítě má velikost a charakter odběru vliv na síťové parametry napětí a proudu v navazujících částech sítě.

Při absenci aplikace technologie bezdrátového přenosu elektrické energie je důležitým prvkem elektrických sítí **vedení**, které z pohledu přenosových a distribučních sítí propojuje jednotlivé prvky navzájem a zajišťuje tak předávání elektrické energie od výroby ke spotřebě. Problematika vedení je, jako u ostatních elementů sítí, rozsáhlá a její řešení a zkoumání není přímo předmětem této práce. Nicméně způsob reprezentace elektrického vedení ve výpočetních modelech má vliv na změny a velikosti některých parametrů, které v konečném důsledku mohou při nesprávné interpretaci degradovat výsledky/informace získané pomocí simulací. Úvahy nad tímto vlivem jsou popsány v příslušné podkapitole kapitoly 6.

Spojení dvou (nebo více) elektrických obvodů, v rámci přenosových a distribučních sítí zpravidla různých napěťových hladin zajišťují **transformátory**. Ty, jako netočivé elektrické stroje, využívají principů elektromagnetické indukce k zajištění předání elektrické energie spolu s galvanickým oddělením mezi zpravidla dvěma úseky sítě. Návaznost, která se týká správnosti

interpretace prvku transformátoru v simulačním prostředí, je podobně jako u vedení dosti rozsáhlá a je uvedena a popsána v rámci příslušné podkapitoly kapitoly 6.

Měření

Získávání informací je součástí každého technologického zařízení, kde se setkáváme s prvky automatizace. Důležitost tématu měření spočívá v nutnosti znalosti chování technologie, kterou člověk provozuje. To platí i o provozu nejen zdrojů s některých spotřebičů, ale i o provozu sítě jako takové. Kvalita měřicího systému se odvíjí od celé řady parametrů, které je možno zohlednit. Požadavky pro výběr snímače jsou v praxi nejčastěji jednoznačnost měření (každé vstupní hodnotě odpovídá právě jedna výstupní hodnota – souvislost s převodní charakteristikou), průběh převodní charakteristiky (nejlépe lineární), přesnost, citlivost, měřicí rozsah, časová konstanta (odezva měřicího obvodu), výkon výstupního signálu, závislost na okolí, vliv na okolí, složitost konstrukce, fyzické rozměry, hmotnost, požadavky na údržbu, spolehlivost a cena atd.

Při zaměření na konkrétní technologii se pak setkáváme s měřením tzv. místním a dálkovým. Místní měření poskytuje obsluze informaci o měřeném parametru přímo v místě měření. Zato dálkové měření má výstup – sekundární přístroj (monitor, displej, ukazatel, signalizační zařízení, ukazovací přístroj, zapisovač, regulátor, počítač) vzdálen od místa měření (obvykle v řídicím centru nebo skříní systému kontroly a řízení (SKŘ)). Díky svým výhodám, jako je např. možnost digitalizace signálu a následná práce s těmito daty (procesy řízení, archivace dat atd.), koncentrace měření z celé technologie v jednom místě atd., je dálkové měření mnohem více preferované než měření místní.

Měřicí kanál dálkového měření může nabývat rozmanitých podob v závislosti na provedení tzv. primárního přístroje (čidlo, snímač, senzor), jehož součástí může i nemusí být převodník a další potřebné prvky, jako např. napájecí zdroj, unifikační článek atp. Pro přenosovou trasu je nejčastěji využit elektrický signál, nejčastěji ve formě tzv. unifikovaného signálu, kdy v dnešní době je nejrozšířenějším proudový signál 4 až 20 mA. Často se lze setkat i s proudovým signálem 0 až 20 mA, napětovým 0 až 10 V, -5 až 5 V apod. Součástí přenosové trasy mohou být moduly oddělení, alarmů a matematických členů atp. Posledním článkem měřicího kanálu je sekundární přístroj popsáný v předchozím odstavci.

Právě z důsledku digitalizace měřených signálů lze všechna měření rozdělit na dvě velké skupiny. První skupinou jsou měření elektrických parametrů, které jsou popsány dále v této kapitole. Druhou, rozmanitější skupinu tvoří všechna ostatní měření. Při těchto ostatních měřeních se využívá konkrétní fyzikální princip, a teprve jeho funkce či důsledky lze převést na signál elektrický. Neelektrická měření lze dále dělit a popisovat až k definicím samotných fyzikálních principů, což by vydalo na velmi tlustou knihu, která by však s tématem této práce souvisela pramálo. V různých výrobních a zpracovatelských technologiích se nejvíce uplatňují tzv. teplotechnická měření. Jde o měření teploty, tlaku, průtoku a hladiny. Tyto čtyři veličiny nejčastěji popisují stav technologického procesu a jsou tak důležité pro řídicí a ochranné (limitační, bezpečnostní) systémy. Měření, která nejčastěji popisují stav technologických zařízení se nazývají mechanická měření. Jde např. o měření otáček, vibrací, posuvů atd. Poslední větší skupinou jsou chemická měření, která nejčastěji dávají informaci o stavu vstupních a výstupních médiích technologie.

Elektrická měření

Pro měření elektrických veličin lze v praxi využít celou řadu principů. Často jsou tyto principy a provedení měřicího obvodu označovány jako tzv. soustavy. Pro měření elektrických parametrů

napětí a proudu lze využít např. magnetoelektrickou, elektrodynamickou, elektromagnetickou, indukční, tepelnou, elektrostatickou či rezonanční soustavu, jejichž popis lze nalézt např. v [20]. S ohledem na volbu principu měření musí být vzato do úvahy, jaký charakter má vstupní signál (zda jde o měření stejnosměrného nebo střídavého napětí/proudu) a jaký typ výstupního signálu lze získat. Obecně je nutné rozlišit, zdali použitím určité měřicí soustavy a celkového měřicího obvodu je získaná okamžitá, maximální, střední nebo efektivní hodnota měřeného napětí/proudu. Do úvahy dále vstupuje otázka, zdali je měřená soustava jednofázová nebo třífázová. S třífázovou soustavou totiž vstupuje do úvahy fakt, že lze měřit napětí mezi fázovými vodiči. Při měření efektivní hodnoty napětí mezi fázovými vodiči je totiž určeno tzv. sdružené napětí, které je o násobek $\sqrt{3}$ větší než efektivní hodnota napětí měřená mezi fázovým vodičem a zemí (popř. středním vodičem), tzv. fázové napětí. Rozsáhlejší popis problematiky lze nalézt např. v [21].

V návaznosti na předchozí odstavec (který se zaměřoval na úvod do problematiky měření napětí a proudu), je vhodné zmínit, že všechny elektrické parametry, které jsou uvažovány v praktické části, lze vypočítat, resp. jsou určeny na základě měření okamžité hodnoty proudu a napětí. Se znalostí okamžitých hodnot proudu a napětí se lze dopočítat k hodnotám ostatních elektrických parametrů jako činný, jalový a deformační výkon, účinník, frekvence, harmonické složky atd. Tato premisa, spolu s úvahou, že řešené sítě mají charakter střídavé soustavy s frekvencí 50 Hz, byla využita při tvorbě příslušných modelů v rámci této práce.

Při definování kvality měření, která je důležitá s ohledem na použití získaného parametru, lze zkoumat celou řadu parametrů. Pokud do problematiky měření či získání potřebné informace bude rovnou zahrnuta digitalizace (např. i z pohledu použití číslicových přístrojů), pak budou významnou roli měřicího systému hrát vzorkovací frekvence a počet kvantizačních úrovní A/D převodníku. Toto je zmíněno s ohledem na fakt, že právě při provádění výpočtu za pomoci simulačního programu je právě vzorkovací frekvence měřeného (simulovaného) parametru dána výpočetním krokem programu. Tento fakt pak hraje významnou roli při analýze přechodových dějů a výpočtů zabývajících se kvalitou elektrické energie (např. výpočet harmonického zkreslení). Obecně je problematiku kvality měření nutné zohlednit při úvaze o využití měřeného či vypočteného parametru. Lépe si lze popis předchozí věty představit např. na příkladu měření proudu, kdy pro ochranné systémy je nutné zajistit „co nejrychlejší“ měření s vysokou vzorkovací frekvencí (z důvodu snahy o co nejrychlejší detekci poruchového proudu v chráněném systému). Stejný proud může být použit v rámci určitého regulačního obvodu, kde obvykle po výpočtu např. efektivní hodnoty daného proudu může vstupovat tato hodnota do výpočetního obvodu regulátoru jako regulovaná veličina. V takovém případě lze okno měření prodloužit a regulovanou veličinu obnovovat na základě měření např. každých 100 ms. Stejný proud může být použit pro zobrazení efektivní hodnoty proudu v řídicím centru. Zde lze použít i jednosekundové okno. Na každé z těchto příkladů měření stejné veličiny pak lze použít i různý primární přístroj a vesměs i odlišnou strukturu kanálu měření. Atributem ovlivňující kvalitu měření je také výpočetní okno dané veličiny. Lze použít pevně daný úsek pro měření a vyhodnocení (např. deset period střídavého napětí či proudu) nebo plovoucí okno, které může lépe interpretovat rychlé přechodové děje.

Měření proudu a napětí v praxi

Konkrétně, pro měření silové elektrické energie větších proudů a vyšších napěťových hladin se nejčastěji používají *přístrojové transformátory proudu* (PTP), resp. *přístrojové transformátory napětí* (PTN) nebo *kapacitní transformátory napětí*. Při měření silové elektrické energie jde zpravidla o snížení hodnoty provozní měřené veličiny proudu či napětí tak, aby s tímto signálem mohly pracovat navazující číslicové obvody. Vzhledem k vývoji, současným trendům a užití

počítačových simulací v rámci této práce není přímé využití analogového signálu v rámci této uvažováno. Výhodou použití PTP a PTN je také izolace měřicích obvodů vůči měřené síti vysokého napětí.

PTP je speciální druh transformátoru, jehož primární vinutí je tvořeno přímo vodičem (či kabelem) energetického systému, na kterém je umístěno toroidní jádro se sekundárním vinutím. Díky nízkým hodnotám hlavní i rozptylné reaktance vzhledem k parametrům elektrizační soustavy nedochází instalací PTP k ovlivnění poměrů v soustavě. [22] S problematikou dimenzování PTP souvisí úvaha o primárním využití měřeného proudu. Jádra PTP rozlišujeme podle účelu použití na přesná měřicí jádra (např. pro fakturační měření) a jisticí jádra (pro ochrany). Zatímco pro měřicí jádra je důležitá přesnost měření v rozsahu provozních proudů a rychlé přesycení u nadproudů (omezení maximální hodnoty sekundárního proudu vstupujícího do elektroměru), u jisticích jader je požadován přenos pro co největší nadproudy i za cenu nižší přesnosti měření. [22]

PTN se vyrábějí ve dvou provedeních – induktivní a kapacitní. Induktivní typ má své primární vinutí na jednom konci galvanicky spojené s fázovým vodičem, zatímco kapacitní typ se skládá z kapacitního děliče napětí a induktivně je měřena pouze příslušná poměrná část fázového napětí. Oba typy PTN poskytují dostatečně přesná měření fázových napětí. Narozdíl od PTP nepředstavují jevy spojené s přesycováním zásadní problém, protože provoz elektrizační soustavy je limitován do výše svého maximálního provozovacího napětí a poruchy v síti většinou vedou ke snížení nebo úplné ztrátě napětí. [22]

Problematika přesnosti měření a správného dimenzování PTP a PTN je podrobněji popsána např. v [22].

Měření proudu a napětí v simulačních programech

V pravém slova smyslu se vlastně nejedná o měření, ale o vyčítání konkrétních hodnot z výpočetní matice dané simulace. Pokud je problematika vztažena k EMT³ programům, jako je PSCAD, je okamžitý průběh vyčítané hodnoty dán časovým sousledem vyčtených hodnot s „vzorkovací frekvencí“ danou nastaveným výpočetním krokem simulace. Problematika je pro rámec programu PSCAD dále popsána v kapitole 6.6.1.

Ochrany

Obecně lze funkci ochrany popsat jako vlastnost, která na základě překročení definovaných (daných, určených) limit určitých parametrů či veličin elektrické energie vydává popud k odpojení vypínače galvanicky spojující chráněný objekt a zbytek elektrické sítě. V rámci této práce není třeba mezi parametry a veličiny zahrnovat jiné než právě elektrické, neboť práce a vzniklé modely jsou zaměřeny primárně na studium provozu elektrické sítě. V reálných provozech se samozřejmě lze setkat s vybavením ochrany na základě překročení limit ochrany od teplotních či mechanických veličin, což je pro tuto práci nerelevantní problematika, která v dalším textu nebude řešena.

Požadavky na chránění konkrétních prvků ES jsou standardizovány. Výčet a značení různých elementů či spíše typů ochranných funkcí je uvedeno v ANSI/IEEE C37.2-2008 [23]. Tohoto značení je s výhodou použito i v této práci.

³ EMT³ je akronym pro Electromagnetic Transients Program, což je softwarový nástroj používaný k analýze elektromagnetických přechodových dějů, zpravidla pracující v časové oblasti vyjádření simulovaného systému pomocí diferenciálních rovnic.

Současné trendy digitalizace přináší spoustu možností realizace různých ochranných funkcí. Základem pro správnou funkci algoritmu ochrany je získání potřebných informací o chráněném objektu. Pokud budou brány v potaz pouze ochranné funkce vycházející z časových průběhů elektrických veličin, pak je první instancí rychlé a přesné měření okamžitých hodnot proudů a napětí. Dalším krokem je zpracování těchto měření. Teprve poté se dostává na řadu samotný algoritmus vyhodnocení poruchy, po kterém následuje povel k provedení akčního zásahu, který lze nejčastěji chápat jako popud k odpojení chráněného objektu od poruchy.

Z obecných požadavků na systém chránění, jako je *spolehlivost*, *selektivita*, *rychlost působení*, *jednoduchost obsluhy* a *ekonomická návratnost*, lze v simulačním prostředí zkoumat pouze některé tyto aspekty. Není uvažováno s tím, že by se modely vzniklé v rámci této práce daly použít pro studie spolehlivosti či ekonomiky provozu. Pokud by tomu tak bylo, konkrétní modely by se staly složitějšími a náročnějšími na výpočetní kapacitu. **Selektivitou** v problematice elektrických ochrany je např. dle [22] myšleno schopnost ochrany (systému ochrany) vypnout pouze postiženou oblast. Pro dodržení selektivity je tak rozhodující, aby zareagoval právě jen ochranný prvek, který je umístěn nejbližší k poruše. Toho lze docílit *časovým odstupňováním* (ochrana nejbližší k místu poruchy působí nejrychleji a ostatní ochrany působí postupně s nastaveným časovým zpožděním), *amplitudovým nebo fázovým porovnáním* (tzv. rozdílové a srovnávací ochrany) a *směrností* (určení směru toku výkonu na vstupu a výstupu objektu). Dle stejného zdroje informací je pak pojem **rychlost působení** chápán jako doba působení ochrany od identifikace poruchy až do vyslání vypínacího impulsu. Požadavky na rychlost působení se mohou velmi lišit. Zásadní faktory, které požadavek na rychlost působení ovlivňují, jsou selektivita, zachování dynamické stability soustavy, minimalizace rozsahu poškození, zkrácení času provozu spotřebičů při sníženém napětí (zvýšeném proudovém odběru) a zmenšení nebezpečí úrazu osob. Je třeba mít na paměti, že celková doba vypnutí poruchy, která má rozhodující vliv na účinky na chráněné zařízení, je dána součtem rychlosti působení ochrany a rychlosti vypnutí vypínače.

V následujícím textu je uveden stručný popis konkrétní funkce ochrany tak, jak ji je nutné chápat pro účely této práce. Pro aplikaci konkrétních typů ochranných funkcí v rámci konceptu chránění VM či konceptu ochranných funkcí agenta je nutné vzít v potaz varianty provedení s ohledem na vazbu s nadřazenou sítí, napájení vlastní spotřeby, uzemnění uzlu generátoru, případně způsob napájení budících obvodů atd. Nelze tedy převzít konkrétní skladbu ochranných funkcí pro daný typ chráněného objektu, ale je nutné poskytnout určité portfolio funkcí, které mohou být aplikovány.

ANSI 27

Podpět'ová ochranná funkce má za úkol ochranu chráněného zařízení před poklesy napětí nebo detekce neobvykle nízkého síťového napětí pro spuštění automatického odpojení zátěže nebo zdroje elektrické energie. Funkce pracuje zpravidla se sdruženými napětími.

ANSI 59

Nadpět'ová ochranná funkce má za úkol detekci abnormálně vysokého síťového napětí nebo kontrolu dostatečného napětí pro umožnění funkce zdroje elektrické energie. Pracuje se sdruženým nebo fázovým napětím.

ANSI 50

Nadproudová ochranná funkce má za úkol ochranu chráněného zařízení před účinky nadproudu a mezifázových zkratů.

Podrobněji jsou funkce ANSI 27, ANSI 59 a ANSI 50 popsány v [22] a [24].

ANSI 81O

Princip funkce nadfrekvenční ochrany je založený na měření kladné odchylky frekvence od své nominální hodnoty. Při překročení nastavené meze dochází k popudu akčních členů ochrany. Zpravidla lze nastavit i časové zpoždění pro vybavení ochrany. Zejména u větších a pro ES významnějších zdrojů se lze setkat se zpravidla dvěma stupni této ochrany (vypínání v různých mezích, s různým časem). Meze pro odpojení VM určuje PPS s ohledem na požadavky pro realizaci systémového frekvenčního odlehčování popsané v Kodexu PS – část V [25].

ANSI 81U

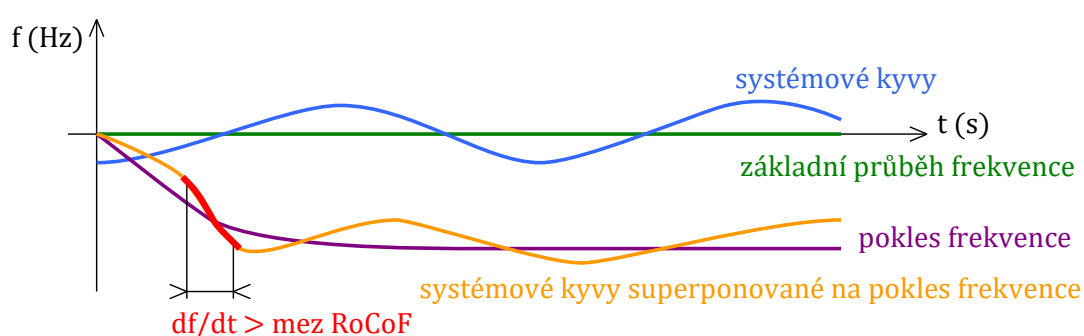
Funkce je obdobou nadfrekvenční ochrany popsané v předchozích odstavcích.

ANSI 81R

Tento typ ochrany se často používá jako doplněk k frekvenčním ochranám 81O a 81U. Jedná se o typ ochranné funkce označované jako RoCoF (Rate of Change of Frequency – rychlost změny frekvence) nebo také df/dt . Obvykle je také vybavena nastavitelnou podmínkou meze frekvence, od které tato ochrana působí (např. nad 50,1 a pod 49,9). Základním principem ochranné funkce je vyhodnocení rychlosti změny měření frekvence – Hz/s. Princip výpočtu rychlosti změny frekvence může být také základem detekce ostrovního provozu – tato problematika je dále probrána v kapitole 4.2.

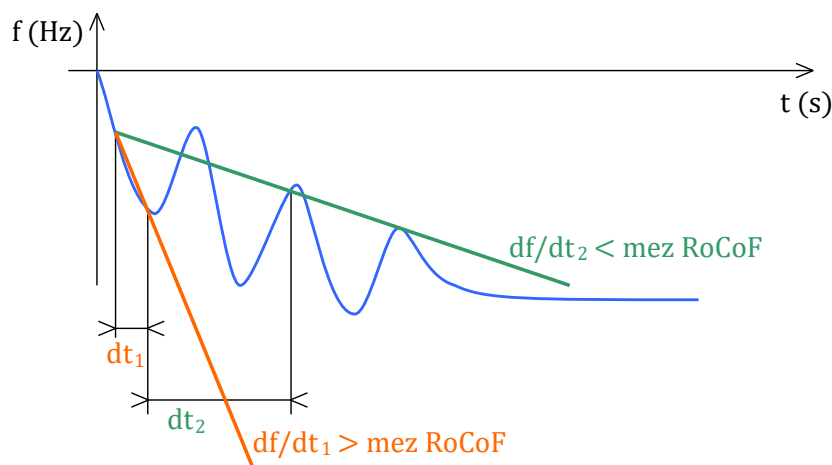
Obecně, problematika měření frekvence a určení rychlosti změny frekvence v čase (derivace) je nebo může být dosti složitá či nejednoznačná a hlavně nejednotná – tím se zabývá v rovině simulačního prostředí kapitola 6.6.2. V následujících svých odstavcích je přiblížena problematika ochrany RoCoF, která má důsledek i v praktické části této práce.

Do problematiky vstupuje „chování“ parametru frekvence napětí sítě v souvislosti s dalšími jevy v síti, např. tzv. systémovými kvyvy, které lze chápat jako superponovaný signál k základnímu signálu frekvence. Spolu se vzniklou výkonovou nerovnováhou v síti mohou tyto jevy vést k chybnému zapůsobení ochrany. Tento jev prezentuje ilustrační obr. 2-4, kde jsou zobrazeny možné okamžité hodnoty frekvence měřené ochranou při různých dějích v síti.



obr. 2-4: Ilustrační příklad možného nechtěného zapůsobení ochrany RoCoF

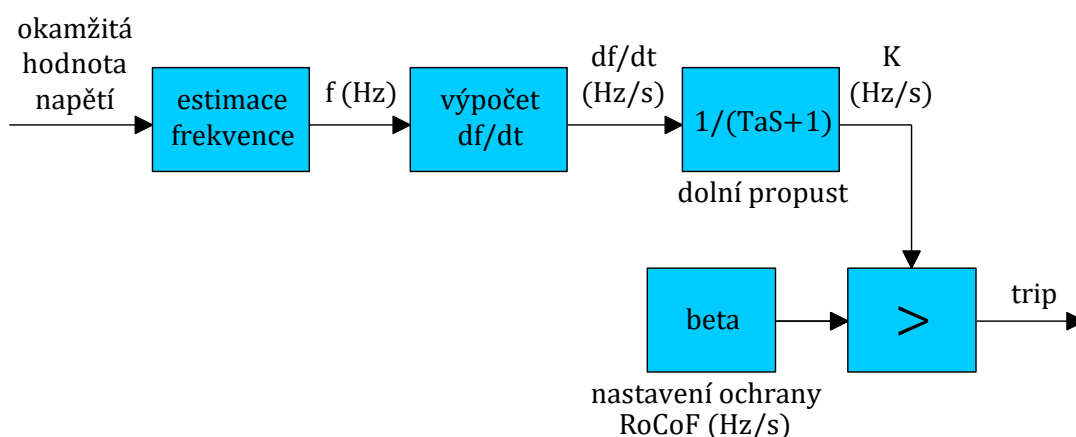
Samotná derivace frekvence musí být řešena v určitém časovém kroku. Změna frekvence v tomto časovém okně, jejíž určování je pouze z hodnot frekvence na začátku a konci časového okna, může „skrývat“ rychlé změny frekvence (s periodou stejnou nebo celočíselně násobnou jako délka časového okna). Ilustrační obr. 2-5 zobrazuje dvě možná vyhodnocení RoCoF stejného průběhu frekvence.



obr. 2-5: Ilustrační příklad různého vyhodnocení derivace ochrany RoCoF

Problematika správného určení a nastavení se může stát dosti nejednoznačná a složitá. O případech možné špatné interpretace popsané v rámci předchozích dvou obrázků se zabývá např. [26], [27] a [28].

Zjednodušené blokové schéma funkce RoCoF uvedené na obr. 2-6 vychází ze schématu funkce RoCoF uvedeném v [28].



obr. 2-6: Blokové schéma funkce RoCoF

2.3 Řízení ES

Popis uvedený v této kapitole je důležitý pro návaznosti v rámci praktické části této práce. Je nutné popsat strukturu a principy funkce řízení ES tak, aby tyto informace bylo možno použít i navazujících kapitolách.

V rámci této kapitoly je uvedena filozofie priorit, která je obecně užívána a do vysoké míry ovlivnila současnou podobu požadavků nejen na provoz, ale i topologii sítí, systém chránění, pravidla provozu a vesměs vše, co s provozováním elektroenergetického systému souvisí. S nejvyšší prioritou se uplatňuje požadavek na **bezpečnost**, ve smyslu nutnosti zajištění takového stavu ES, která svým provozem neohrozí zdraví lidí a zvířat. Dalším požadavkem je **spolehlivost** provozu ES. Nespolehlivost provozu ES sebou nese rizika národohospodářských škod, které mají v delším časovém horizontu vliv kvalitu života obyvatel a národní bezpečnost. V pořadí třetím požadavkem je **kvalita**. Snížením kvality globálních či lokálních parametrů elektrické energie

dochází k degradaci zařízení, které elektrickou energii využívají. To vede jednak (směrem vzhůru) ke snížení spolehlivosti jejich provozuschopnosti, což může v konečném důsledku ohrozit i bezpečnost osob, zvířat přírody či majetku, a jednak (směrem dolů) ke zvýšení nákladů na provoz, údržbu a životnost zařízení. Posledním požadavkem je **ekonomika**. Na problematiku ekonomiky provozu ES se dá nahlížet z různých pohledů a do hloubky popisovat a rozvádět různé návaznosti by bylo nad rámec této práce. Obecně lze požadavek na ekonomiku popsat jako snahu o co nejnížší náklady na výrobu, přenos a distribuci elektrické energie, při zachování výše zmíněných priorit – kvalita, spolehlivost, bezpečnost.

Principy, které se využívají při řízení ES vycházejí z popisu ES jako soustavy určité množiny prvků, mezi nimiž platí konkrétní zákonitosti. Veličiny, kterými lze vazby mezi prvky soustavy popsat, jsou okamžitá hodnota elektrického napětí a okamžitá hodnota elektrického proudu. Ostatní veličiny používané při popisu ES vycházejí právě z těchto veličin. Samotný popis charakteristiky napájecího napětí pak vychází z jeho kmitočtu, velikosti, tvaru vlny a symetrie napětí v případě trojfázové soustavy. Současné celkové schéma je takové, že zdroje elektrické energie dodávají požadovanou energii v závislosti na odběrech zátěží a ztrátách. Principy řízení elektrické sítě vychází z úvahy nad neskladovatelností elektrické energie a ztrátami, které vznikají při její přeměně – nejen ekonomické hledisko, ale i veliký environmentální přínos. U střídavých soustav, na které je tato kapitola zaměřena (– ve smyslu popisu ES), je využit parametr frekvence napětí jakožto globální parametr, o kterém se dá říct, že je všude v propojené střídavé soustavě stejný, a pomocí kterého lze řídit výkonovou bilanci sítě. Dále je pro řízení využit parametr velikosti napětí, která má lokální charakter, závislý na impedanci sítě a toku výkonu.

V první instanci lze stanovit vztah popisující celkovou bilanci systému jako stav, kdy součet dodávaných výkonů všech zdrojů v síti je roven součtu veškeré spotřeby, součtu veškerých ztrát a součtu výkonu upotřebeného na akumulace elektrické energie. Při splnění bilance je řeč o systémové rovnováze. Ta je zajišťována stranou výroby, s případnou pomocí zátěže v abnormálních stavech⁴ či domluvených a plánovaných situacích. S tím souvisí pojem regulační výkon, který je požadavkem na zajištění dostatečného množství, o který může být snížena nebo zvýšena výroba (případně i spotřeba), a která souvisí s dostatečnou zdrojovou základnou pro zajištění pokrytí poptávky spotřeby během celého času.

Požadavky na zajištění spolehlivého a bezpečného provozu ES jsou definovány v dokumentech ENTSO-E, a pro oblast ČR jsou zajišťovány činností PPS ČR – ČEPS, a.s. skrze tzv. dispečerské řízení, které zahrnuje přípravu provozu ES, operativní řízení provozu ES a hodnocení provozu ES. Regulační výkon je dán součtem FCR (Frequency Containment Reserves – zálohy pro automatickou regulaci frekvence), aFRR (automatic Frequency Restoration Reserves – zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s automatickou aktivací) a mFRR (manual Frequency Restoration Reserves – zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s manuální aktivací).

Pro zajištění kvality a spolehlivosti dodávky elektrické energie na úrovni PS a plnění mezinárodních závazků a podmínek pro propojení PS ČR s okolními PS jsou PPS využívány tzv. Systémové služby (SyS). SyS jsou [15]:

- Udržování kvality elektrické energie

⁴ Abnormální stav se dá obecně popsat jako stav, který je nežádoucí, stav, se kterým je počítáno, že může nastat, a pro který existují v rámci provozu sítě prostředky a mechanismy, pomocí kterých je umožněn návrat do normálního stavu.

Využívající tyto technicko-organizační prostředky:

- udržování souhrnných rezervovaných záloh pro proces automatické regulace frekvence,
- automaticky ovládaný proces obnovení frekvence a výkonové rovnováhy,
- ručně ovládaný proces obnovení frekvence a výkonové rovnováhy,
- sekundární regulace napětí,
- terciární regulace napětí,
- zajištění kvality napět'ové sinusovky,
- zajištění stability přenosu,

kdy kritéria pro posuzování kvality elektrické energie vycházejí z platných technických norem.

- Udržování výkonové rovnováhy v reálném čase

Zajišťování výkonové rovnováhy je prováděno těmito technicko-organizačními prostředky:

- automaticky ovládaným procesem obnovení frekvence a výkonové rovnováhy,
- ručně ovládaným procesem obnovení frekvence a výkonové rovnováhy,
- snížením výkonu,

kdy kritéria pro posuzování kvality udržování výkonové rovnováhy a salda předávaných výkonů vycházejí z obecně platných doporučení v rámci ENTSO-E.

- Obnovení provozu

Jako hlavní prostředek se využívá plán obnovy spolu s PpS ostrovní provoz a start ze tmy, kdy kritéria pro posuzování kvality obnovení provozu vycházejí z předpisů platných v rámci ČEPS a ENTSO-E.

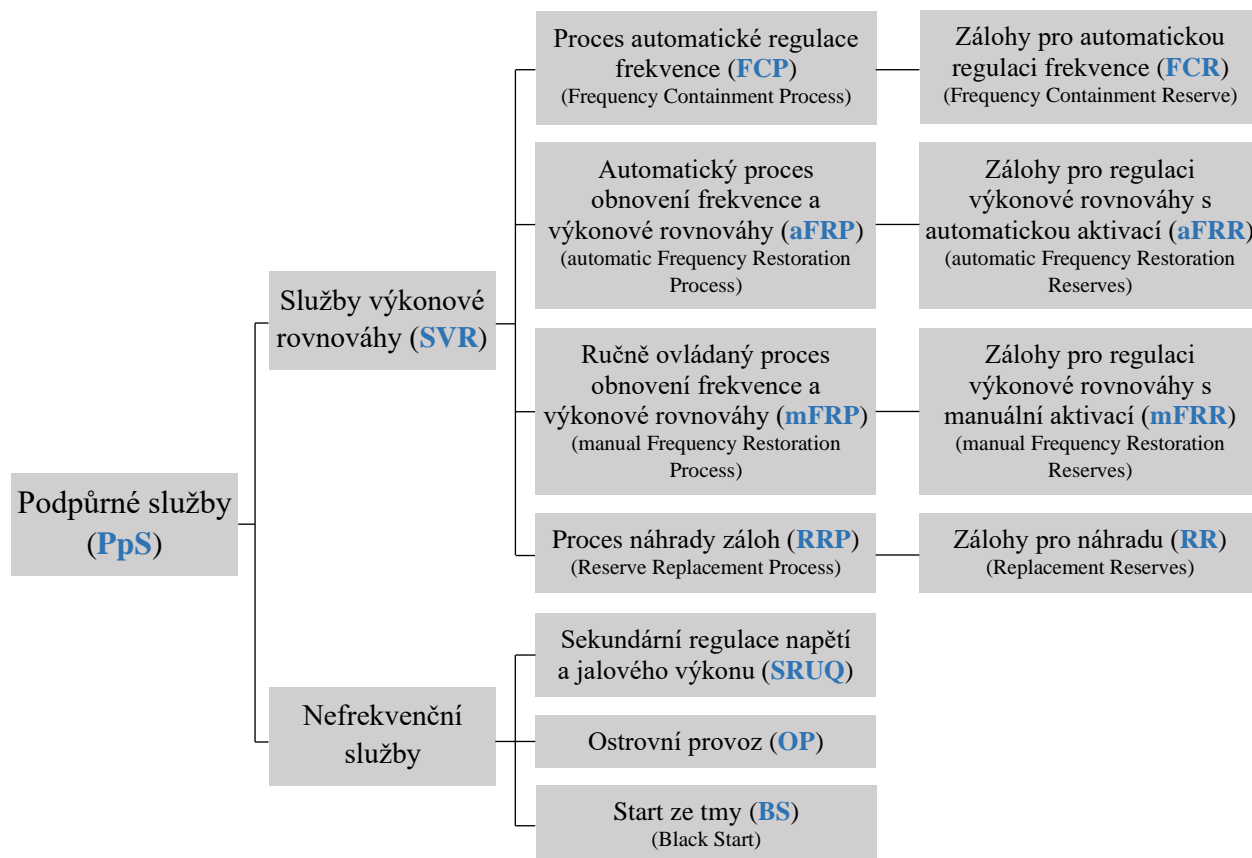
- Dispečerské řízení

Kromě výše uvedených prostředků zahrnuje tato služba dále:

- zajišťování bezpečnosti provozu prostřednictvím plánu obrany a provozních instrukcí,
- řízení propustnosti sítě (toků činných výkonů) pomocí zapojení sítě, redispečinku, protiobchodu,

kdy kritéria pro posuzování kvality dispečerského řízení vycházejí z předpisů a provozních instrukcí platných v rámci ČEPS a ENTSO-E.

SyS jsou zajišťovány prostředky v rámci tzv. Podpůrných služeb (PpS). Ty jsou definovány jako činnosti fyzických nebo právnických osob pro zajištění provozování ES a kvality a spolehlivosti dodávky elektrické energie. PpS umožňují korigovat rozdíly mezi výrobou a spotřebou, skrze požadavky na změny výkonů výroben a odběru zátěží. Pro zajištění činnosti PpS tak musí existovat subjekty na straně výroby i spotřeby, které jsou na základě finanční motivace a při splnění technických a obchodních kritérií vybrány PPS pro poskytování určitých PpS. Jednotlivé kategorie a rozdělení PpS je ilustrováno na obr. 2-7. Podrobně je každá PpS popsána v části 2 Kodexu PS [29].

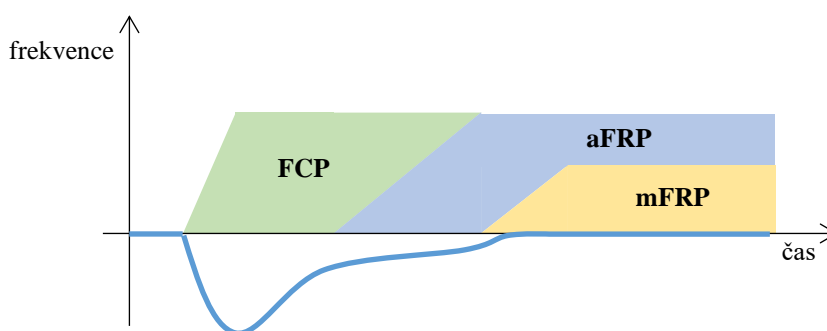


obr. 2-7: Struktura PpS

Podrobnější informace o problematice řízení ES lze hledat např. v [2], [15], [16], [29] a [30].

2.3.1 Technicko-organizační prostředky pro zajištění SyS

Pro zajištění provozu sítě jsou využívány principy a systémy popsány v následujících podkapitolách. Návaznosti SVR lze pro prvotní popis ilustrovat pomocí obr. 2-8.



obr. 2-8: Služby výkonové rovnováhy

Udržování souhrnné výkonové zálohy pro primární regulaci frekvence

V rámci SyS je nutné zajistit udržování výkonové zálohy pro proces primární regulace frekvence (Frequency Containment Process – FCP) o dostatečné velikosti a kvalitě, s požadovanou statikou a dynamikou. Při narušení výkonové rovnováhy mezi výrobou a zatížením se na obnovení výkonové rovnováhy podílejí všechny VM pracující do propojené soustavy, které jsou do primární regulace frekvence zapojeny v jednotlivých regulačních oblastech. Důsledkem nerovnováhy je, jak už bylo zmíněno výše, změna síťové frekvence, která se dá vyjádřit rovnicí:

$$\Delta P = -\lambda \Delta f \quad (2.1)$$

kde ΔP (MW) je změna výkonu v síti; λ (MW/Hz) je výkonové číslo regulační oblasti, někdy označované symbolem K_s ; Δf (Hz) je změna frekvence v síti. Výkonové číslo se tedy logicky odvíjí od velikosti propojené elektrické soustavy. Průměrná hodnota výkonového čísla pro regulační oblast kontinentální Evropy (RGCE – Regional Group Continental Europe) (ve které se nachází ES ČR) je 19,5 GW/Hz [31].

Primární regulaci frekvence má za úkol zvýšit, resp. snížit výkon s cílem zastavení poklesu, resp. nárůstu frekvence v síti od nominální hodnoty 50 Hz, a to v časovém intervalu několika sekund. Zálohy výkonu pro primární regulaci frekvence (FCR) každé regulační oblasti je stanoven na základě toho, jak velký výpadek výkonu se má pokrýt právě činností primární regulace frekvence. Požadavky na primární regulaci frekvence jsou definovány v [29] a [31] a vychází ze simulované změny frekvence – výpadku zdroje výkonu 3000 MW v soustavě se zatížením 150 GW, se samoregulačním efektem zátěže 1 %/Hz, kdy při této události nesmí maximální odchylka změny frekvence překročit hodnotu -800 mHz, resp. absolutní hodnotu odchylky 180 mHz v ustáleném stavu. Pokud není zohledněn samoregulační efekt zátěže, nesmí absolutní hodnota odchylky frekvence přesáhnout 200 Hz. Na řešení vzniklého výpadku se podílejí na základě principu solidarity⁵ všechny zdroje zapojené do primární regulace frekvence, které se nacházejí v propojené soustavě.

Primární regulace frekvence musí plně poskytnout regulační rezervu do 30 s od vzniku výkonové nerovnováhy. Zajištění kapacity výkonové rezervy je základní povinností PPS jejichž soustavy se nacházejí v RGCE. Na primární regulaci frekvence se podílejí VM poskytující SVR pro danou oblast.

Sekundární regulace f a P

Sekundární regulace frekvence a činného výkonu navazuje svou činností na primární regulaci frekvence a jejím úkolem je automatické udržování frekvence na jmenovité hodnotě a výkonové rovnováhy ve své regulační oblasti, se započtením sjednaných sald předávaných výkonů se sousedními soustavami/oblastmi. Jedná se tak o využití principu neintervence⁶. Sekundární regulace frekvence a činného výkonu je automatický proces obnovení frekvence a výkonové rovnováhy (aFRP), který je zajišťován dispečinkem ČEPS, a který má za cíl postupně nahradit výkon, který byl poskytnut v rámci primární regulace frekvence na základě principu solidarity VM ostatních oblastí v propojené soustavě. Do procesu sekundární regulace jsou připojeny terminály VM, které poskytují PpS Zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s automatickou aktivací (aFRR) v rámci SVR a terminály v hraničních rozvodnách, které měří předávaný výkon se sousedními soustavami. Vzniklá regulační odchylka je dána rovnicí:

$$G = \Delta P + K \cdot \Delta f \quad (2.2)$$

kde G (MW) je regulační odchylka; ΔP (MW) je odchylka předávaných výkonů od plánované hodnoty; K (MW/Hz) je nastavený parametr, který by se měl rovnat výkonovému číslu λ , aby princip neintervence platil ideálně; Δf (Hz) je změna frekvence v síti. (Okamžitá regulační odchylka

⁵ Princip solidarity znamená, že na řešení vzniklé výkonové nerovnováhy mezi zatížením a výkonem soustavy se podílejí všechny VM, které jsou zapojeny do primární regulace frekvence v jednotlivých regulačních oblastech.

⁶ Princip neintervence znamená, že způsobenou výkonovou nerovnováhu (projevující se změnou frekvence a odchylkou nasmlouvaných předávaných výkonů mezi oblastmi) řeší pouze postižená regulační oblast, ve které výkonová nerovnováha vznikla.

výkonu nesmí být zaměňována za systémovou odchylku, která představuje odchylku energie subjektů zúčtování za obchodní interval.)

Sekundární regulace frekvence a činného výkonu by měla obnovit zadané hodnoty frekvence a předávané výkony do 15 minut od vzniku výkonové nerovnováhy.

Terciární regulace výkonu

Terciální regulace výkonu navazuje svou činností na sekundární regulaci frekvence a činného výkonu s cílem udržení potřebné zálohy sekundární regulace. Na procesu obnovení frekvence a výkonové rovnováhy (mFRP) a procesu náhrady záloh (RRP) se podílejí VM poskytující SyS Zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s manuální aktivací (mFRR) a Zálohy pro náhradu (RR) v rámci SVR.

VM poskytující službu zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s manuální aktivací mohou poskytovat různou variantu zálohy: mFRR5 (aktivace do 5 minut, minimální velikost VM je 30 MW, minimální doba garance poskytování služby je 4 hodiny), mFRR15+ (poskytnutí kladné zálohy, 15 minut, min. 10 MW, max 70 MW, neomezeně), mFRR15- (poskytnutí záporné zálohy, 15 minut, min. 10 MW, max 70 MW, neomezeně)

Nefrekvenční služby

Důležitou návaznost pro pochopení chování sítě z pohledu napěťových poměrů, například v místě připojení VM nebo obecně v jakémkoliv místě sítě, mají úlohy dispečinků PPS a PPD a automatické funkce různých prvků sítě, které vychází z kodexu PS a PPDS. Právě v návaznosti na kodex PS je řeč o sekundární regulaci napětí (ASRU). Jde o proces, který má za úkol udržet zadané napětí v pilotním uzlu PS. Zadané napětí v pilotních uzlech je dáno dispečinkem PPS na základě výpočtů optimalizačním programem. Tento optimalizační proces koordinuje napětí v pilotních uzlech pro bezpečný a ekonomický provoz ES a je nazýván terciární regulací napětí.

Sekundární regulace napětí je realizována automatickým regulátorem napětí, který na základě odchylky skutečného a zadaného napětí v pilotním uzlu určuje potřebný jalový výkon na odregulování vzniklé odchylky. Hodnota požadovaného jalového výkonu je posílána na elektrárny poskytující PpS Sekundární regulace napětí a jalového výkonu (SRQU).

Do ASRU jsou zařazeny i kompenzační tlumivky, které jsou využívány v případě vyčerpání regulačních rezerv jalového výkonu VM, a hladinové regulátory transformátorů.

PPS dále v rámci normálního provozu zajišťuje stabilitu přenosu. Cílem je zajištění stability přenosu činných výkonů a tlumení výkonových kyvů v soustavě kontrolou statické a dynamické stability soustavy. Kontrola je řešena na základě vyhodnocení měřených dějů v reálném čase a výpočty stability. Výstupem jsou návrhy opatření pro nastavení hlídání meze podbuzení SG, zesílení regulátorů buzení a změny nastavení systémových stabilizátorů (PSS – Power System Stabilizers) v regulátorech buzení jednotlivých SVM. Tyto návaznosti řeší také Plán obrany soustavy v opatření proti kývání a ztrátě synchronismu (řešený v příloze 5 kodexu PS [25]).

2.4 Setrvačnost systému

S vazbou na kapitolu 2.3 je nutné popsat problematiku setrvačnosti systému. Setrvačnost systému musí být brána v kontextu se stabilitou frekvence v souvislosti s bilancí činného výkonu v síti. Tato problematika má dále návaznost jednak na modely NVM v rámci požadavku na zajištění umělé setrvačnosti a jednak na model sítě, který je pro kompletaci této práce také nutné

řešit. Tato kapitola je provázána s problematikou řešenou v rámci podkapitoly Setrvačnost (strana 89) v rámci popisu rozdílů mezi IBG s SG.

Při odchylce frekvence systému je díky elektromechanické vazbě v prvním okamžiku poskytnuta kinetická energie setrvačných hmot točících se rotorů SG. Pokud je setrvačnost systému malá, dochází k rychlejšímu výkyvu frekvence a tím k větší odchylce frekvence od nominální hodnoty. Setrvačnost systému (system inertia) (H_{sys}) je dána vztahem [32]:

$$H_{sys} = \sum_i \frac{H_{gen,i} \cdot S_{gen,i}}{S_{sys}} \quad (2.3)$$

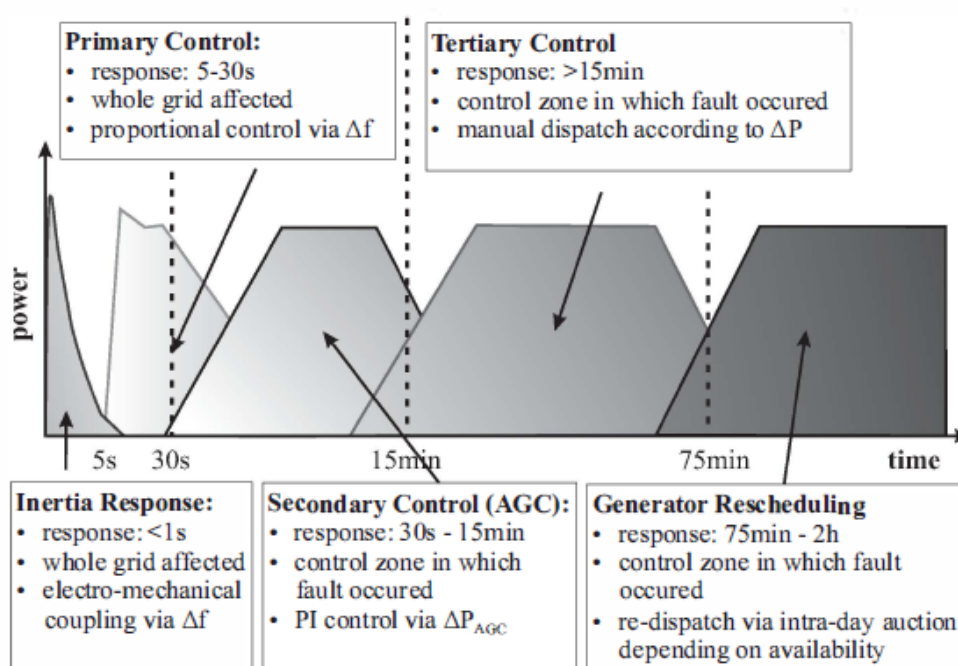
kde H_{gen} (s) je setrvačnost generátoru; S_{gen} (MVA) je nominální zdánlivý výkon generátoru; S_{sys} (MVA) je instalovaný výkon soustavy. Jedná se tedy o vážený průměr setrvačností všech generátorů instalovaných v soustavě.

Setrvačnost generátoru (H_{gen}) (někdy označována i jako časová konstanta setrvačnosti) vyjadřuje (např. dle [33]) dobu, po kterou je generátor schopen dodávat výkon pouze z kinetické energie uložené v setrvačných hmotách jeho rotoru, bez přidané mechanické energie. Rovnici pro výpočet setrvačnosti synchronního generátoru (H_{gen}) lze například dle [33] formulovat jako:

$$H_{gen} = \frac{E_{kin}}{S_{gen}} = \frac{\frac{1}{2} J (2\pi f_m)^2}{S_{gen}} \quad (2.4)$$

kde E_{kin} (J) je kinetická energie; J ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$) je moment setrvačnosti stroje; f_m (Hz) je frekvence otáčení stroje; S_{gen} (MVA) je nominální zdánlivý výkon generátoru.

Odezva setrvačnosti systému nelze jakkoliv ovlivnit řízením. V prvním okamžiku změny frekvence jsou to právě setrvačné hmoty, které definují odezvu. Až posléze reaguje primární regulace frekvence (jak je popsáno v kapitole 2.3.1), na niž navazují další regulace. Souhrnně lze tuto odezvu vyjádřit pomocí ilustrace na obr. 2-9 (Ilustrace a popis byl převzat z [33]).



obr. 2-9: Instance řízení frekvence v rámci ENTSO-E [33]

Setrvačnost není přirozená vlastnost IBG. Jejich zvyšující se podíl tak snižuje celkovou setrvačnost systému. To má vliv na samotnou strategii řízení frekvence, principy funkce ochrany a

celou řadu dalších synergií v rámci provozu soustav. Parametr, na kterém se důsledky integrace zdrojů bez přirozené setrvačnosti dá sledovat, je rychlost změny frekvence (Rate-of-Change-of-Frequency – RoCoF), která nastane při výpadku zdroje nebo velkého odběru. Míra rychlosti změny frekvence vychází přímo z rovnic 2.3 a 2.4. Problematiku vývoje sítí s ohledem na RoCoF popisuje [34] a například v [35] jsou uvedeny základní principy řešení tohoto problému. Tím je umělá setrvačnost (synthetic inertia) IBG (v některých literaturách označována jako virtual inertia nebo artificial inertia).

RoCoF je časová derivace systémové frekvence – df/dt . Nenulová, nebo spíše signifikantní hodnota RoCoF v rámci provozu systému nastane v okamžiku odpojení generátoru nebo odběru. Z výpočtu uvedeného v [34] lze rychlost změny frekvence v čase vyjádřit následující rovnicí:

$$\frac{d\Delta f}{dt} = \frac{f_n \cdot \Delta P}{2 \cdot H_{sys} \cdot S_{sys}} \quad (2.5)$$

kde Δf (Hz) je odchylka frekvence; dt (s) je změna času / časový interval; f_n (Hz) je nominální hodnota frekvence sítě; ΔP (W) je odchylka činného výkonu; H_{sys} (s) je setrvačnost systému; S_{sys} (VA) je zdánlivý výkon zdrojů přispívajících k setrvačnosti. Důsledky změn setrvačnosti systému a problematikou setrvačnosti v kontextu s celoevropskou propojenou soustavou a jejich změnami v důsledcích implementace IBG je rozebrána v [36].

2.4.1 Technické možnosti zajištění požadované setrvačnosti systému

Existuje více možností, jak řešit snižování setrvačnosti systému. Nej přirozenější cestou, jak zvýšit setrvačnost systému, je instalace nových SG. Instalace a provoz nových SG, popř. synchronních kompenzátorů, by přispěla k navýšení setrvačnosti sítě. Další, modernější možností, je využití umělé setrvačnosti u zařízení využívajících prvky výkonové elektroniky.

Umělá setrvačnost

V případě NVM lze schopnost požadované setrvačnosti řešit implementací tzv. umělé setrvačnosti. V takovém případě je setrvačnost zdroje řešena skrze rychlou změnu výměny činného výkonu se sítí. Logicky, v případě snížení frekvence to znamená dodávku výkonu, v případě zvýšení odběr. Takové řešení lze dle [32] aplikovat například na bateriové systémy, superkapacitory a FACTS (Flexible AC Transmission Systems). Literatura [37] uvádí možnost aplikace umělé setrvačnosti na DFIG (Doubly Fed Induction Generators), které jsou často součástí technologií VtE, [35] podobně uvádí možnost implementace umělé setrvačnosti na synchronní či asynchronní generátory připojené přes AC/DC/AC měniče (back-to-back converters). V rámci této práce je podstatná informace, že požadavek na schopnost umělé setrvačnosti nesynchronních výrobních modulů je požadavkem RfG (článek 21.2, rozvedeno v kapitole 3.1), jehož možnou povinnost implementace převádí na PPS.

Nebezpečné důsledky, které hrozí při snižování setrvačnosti konkrétní soustavy, byly zpočátku řešeny zejména s ohledem na VtE, a to díky jejich prevalenci v podílu NVM [38]. Tato problematika byla řešena zejména v soustavách s nižší setrvačností (Severní Irsko, Austrálie) [39].

Umělá setrvačnost (Synthetic Inertia) je občas brána do kontextu s rychlou frekvenční odezvou⁷ (Fast Frequency Response – FFR). Rychlá frekvenční odezva je v podstatě funkce frekvenčně závislého režimu, která je také jeden z požadavků na VM dle RfG apod. Obě funkce

⁷ Rychlá frekvenční odezva je např. dle [129] definována jako řízený příspěvek momentu generátoru, který rychle reaguje na změny frekvence tak, aby změna momentu působila proti účinku snížené setrvačnosti.

(umělá setrvačnost a rychlá frekvenční odezva) se v rámci svých povelových výstupů překrývají. Rozdíl mezi oběma funkcemi lze nejjednodušeji popsat tak, že zatímco funkce frekvenčně závislého režimu je funkcí velikosti odchylky frekvence, funkce umělé setrvačnosti je funkcí rychlosti změny frekvence (RoCoF). Nejedná se tudíž o stejnou funkci. Aby byla umělá setrvačnost prakticky implementovatelná, je potřeba vzít do úvahy aspekty, jako je samotné měření frekvence a měření či výpočet její změny, další vlastnosti VM (napětí meziobvodu střídače, akumulovanou energii atd.), nastavení funkce umělé setrvačnosti apod. Podrobněji problematiku vysvětluje [38].

Definici umělé setrvačnosti tak, jak ji lze později použít i v modelech VM lze vyjádřit následující rovnicí [40]:

$$\Delta P = 2H_{syn} \frac{df}{dt} f \quad (2.6)$$

kde ΔP (MW) je změna činného výkonu zdroje; H_{syn} (s) je konstanta umělé setrvačnosti daného zdroje; df (Hz) je změna frekvence sítě (měřeno v předávacím místě); dt (s) je změna času / časový interval.

V odborné literatuře se lze setkat se dvěma základními strukturami umělé setrvačnosti. První z nich je tzv. jednosmyčková (One loop), kdy požadovaná změna výkonu zdroje je úměrná rychlosti změny frekvence (RoCoF). Tato struktura je popsána např. v [41], [42] a [43]. Druhá, tzv. dvousmyčková (Two loops) využívá pro funkci požadované změny výkonu zdroje kromě RoCoF také absolutní změnu frekvence od požadované (nominální) hodnoty. Tato struktura je popsána např. v [44], [45] a [46]. Ač se publikace odkazované v tomto odstavci vesměs věnují problematice větrných turbín, lze strukturu aplikace funkce umělé setrvačnosti aplikovat i na obecný NVM.

3 ZDROJE V ES

Tato kapitola pojednává o vlastnostech různých zdrojů s ohledem na síť, do které dodávají výkon. Rozděluje zdroje do určitých skupin s ohledem na různé vazby a vlastnosti a popisuje nutný teoretický základ o požadavcích na zdroje. Celková práce je, jak už bylo zmíněno, zaměřena také na problematiku možností ověřování vlastností zdrojů připojovaných do ES. Proto tato kapitola také zmiňuje současné legislativní požadavky.

Pro přehlednost byla pro tuto, ale i další kapitoly převzata konvence označování dvou základních typů zdrojů – *SG (Synchronous Generators)* pro synchronní generátory a *IBG (Inverter-Based Generators)* pro měničové zdroje. Paralelně k tomu jsou v této práci používány pojmy *synchronní výrobní modul (SVM)* a *nesynchronní výrobní modul (NVM)*. SVM je dle RfG [1] nedělitelný soubor zařízení, který je schopen vyrábět elektrickou energii tak, že frekvence vyrobeného napětí, rychlost generátoru a frekvence napětí v síti jsou ve stálém poměru, a tedy v synchronismu. Tuto definici splňují právě SG. NVM je dle RfG [1] blok nebo soubor bloků vyrábějící elektrickou energii, který je nesynchronně připojen k soustavě, nebo je připojen prostřednictvím výkonové elektroniky, a který je k přenosové soustavě, k distribuční soustavě včetně uzavřené distribuční soustavy, nebo k vysokonapěťové stejnosměrné soustavě připojen v jediném místě připojení. Tuto definici splňují právě IBG.

Další důležitou návazností vycházející z popisů v legislativních dokumentech je chápání rozdílu mezi *výrobním modulem* a *výrobnou elektrické energie*. Mezi požadavky na tyto dvě entity je nutné vnímat rozdíly, neboť se nejedná technicky o totéž. Výrobní modul (power-generating module) je buď SVM nebo NVM (viz předchozí odstavec), zatímco výrobní elektrické energie (power-generating facility) je zařízení převádějící primární energii na elektrickou energii a skládá se z jednoho nebo více výrobních modulů připojených k soustavě v jednom nebo více místech připojení. Navíc, při určování významnosti výrobních modulů by se mělo vycházet z jejich velikosti a z toho, do jaké míry ovlivňují celou soustavu. Synchronní stroje by měly být rozděleny do skupin podle velikosti a měly by zahrnovat všechny složky výroby, které běžně fungují neoddělitelně (například samostatné alternátory poháněné samostatnými plynovými a parními turbínami v paroplynovém zařízení). U výroby, která má několik takových paroplynových zařízení, by každé z nich mělo být posuzováno podle velikosti, nikoli podle kapacity celé výroby. Nesynchronně připojené výrobní jednotky, které jsou sestaveny tak, aby tvořily hospodářskou jednotku, a které mají jen jedno místo připojení, by měly být posuzovány podle své souhrnné kapacity. [1]

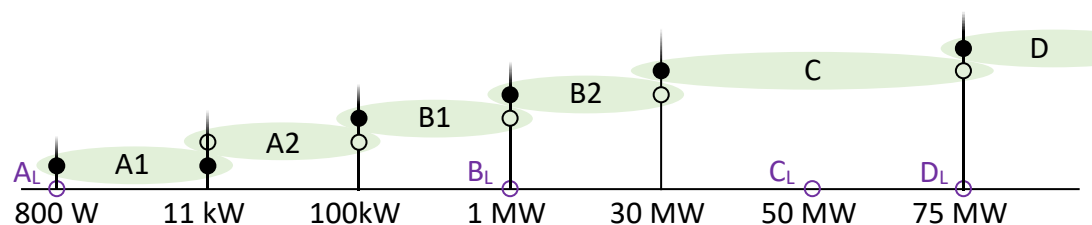
3.1 Požadavky na zdroje

Kapitola 3.1 se zabývá teorií a legislativou s ohledem na zdroje v ES a je podkladovou kapitolou pro hlavní praktickou část této práce. Informace, se kterými je nutné v rámci dané problematiky pracovat jsou RfG [1], PPDS – Příloha 4 [47], ČSN EN 50549-1 [48], ČSN EN 50549-2 [49] a Metodika ověření souladu s požadavky RfG [50].

V posledních letech se začínají uplatňovat nové legislativní požadavky na nové zdroje připojované do sítě. To postihuje zejména IBG, které jsou nuceny poskytovat oproti minulosti více funkcí, které mají být podobné vlastnostem SG. Důležitým dokumentem, který stanovuje požadavky na připojení zdrojů k ES, je nařízení Komise (EU) 2016/631 [1] ze dne 14. dubna 2016, kterým se stanoví kodex sítě pro požadavky na připojení výroben k elektrizační soustavě. Toto nařízení se běžně označuje jako RfG (Requirements for Generators) – požadavky na zdroje.

Nařízením Komise (EU) 2016/631 [1] se, mimo jiné, stanovují požadavky na připojení výroben elektrické energie k propojené ES. Tyto požadavky jsou také označovány jako NC RfG (Network Code, Requirements for Generators – Kodex sítě, Požadavky na generátory). RfG se vztahují na nové výrobní jednotky, které jsou považovány za významné – to souvisí především s velikostí zdroje (viz. typy zdrojů níže) a s tím, jak svým provozem ovlivňují celou soustavu. RfG by se neměly vztahovat na již existující výrobní a na výrobní, které sice nejsou dokončené, ale jsou v pokročilém stádiu plánování, pokud členský stát či příslušný orgán nerozhodne jinak.

RfG v článku 5 definuje kategorizaci zdrojů do čtyř skupin (A, B, C a D) – tzv. typy výrobních modulů (VM), které jsou svou velikostí již považovány za významné, a pro které dále definuje požadavky. Za VM typu A je považován zdroj s výrobní kapacitou minimálně 0,8 kW a napětím v místě připojení nižším než 110 kV. Pro VM typu B a C platí podmínka maximálního napětí v místě připojení 110 kV. Pro VM typu D platí podmínka minimálního napětí v místě připojení 110 kV (včetně). S ohledem na výrobní kapacitu VM typu B, C, resp. D stanovuje RfG pro kontinentální Evropu limitní (minimální, prahovou) hodnotu 1 MW, 50 MW resp. 75 MW a nechává provozovatele přenosových soustav individuálně pro svoji část ES vymezit výkonové hranice typů VM. Pro ČR je typ A a B dále ještě rozdělen vždy na dvě části. Celkové rozdělení typů VM je uvedeno v příloze 4 PPDS (Pravidla provozování distribučních soustav – Příloha 4 - Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulacních zařízení se sítí provozovatele distribuční soustavy) [47]. Toto dělení vyplývá z požadavků české legislativy, zejména s vazbou na Energetický zákon (Zákon č. 458/2000 Sb. o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů) [14] a Vyhlášku č. 79/2010 (Vyhláška č. 79/2010 Sb. o dispečerském řízení elektrizační soustavy a o předávání údajů pro dispečerské řízení) [19]. Na obr. 3-1 je zobrazeno rozdělení typů VM platných podle českých požadavků.



A_L , B_L , C_L a D_L jsou limity prahových hodnot maximální kapacity, od které je VM výrobním modulem daného typu dle RfG (pro kontinentální Evropu)

obr. 3-1: Typy výrobních modulů dle PPDS

PPDS dále uvádějí požadavky na jednotlivé typy VM. Tyto požadavky jsou uvedeny v tab. 3-1. Požadavek na VM je uváděn příslušným článkem RfG, který požadavek definuje. Konkrétní popis a pojmenování požadavků na VM pro účely této práce je uvedeno v následující podkapitole 3.1.1.

tab. 3-1: Požadavky na výrobní moduly dle PPDS

kategorie výrobního modulu a výrobní kapacita	požadavek RfG
800 W \leq A1 \leq 11 kW	čl. 13 pro VM typu A
11 kW $<$ A2 $<$ 100 kW	čl. 13 pro VM typu A čl. 14.2, 14.3, 14.4, 14.5 pro VM typu B čl. 20 pro NVM typu B
100 kW \leq B1 $<$ 1 MW	čl. 14 pro VM typu B čl. 17 pro SVM typu B čl. 20 pro NVM typu B
1 MW \leq B2 $<$ 30 MW	čl. 14 pro VM typu B čl. 15.2, 15.3, 15.4, 15.5a, 15.5b, 15.5c, 15.6a, 15.6b, 15.6c pro VM C čl. 17 pro SVM typu B čl. 18 pro SVM typu C čl. 21 pro NVM typu C
30 MW \leq C $<$ 75 MW	čl. 15 pro VM typu C čl. 18 pro SVM typu C čl. 21 pro NVM typu C
75 MW \leq D	čl. 16 pro VM D čl. 19 pro SVM typu D čl. 22 pro NVM typu D

PPDS se také odkazují na normy ČSN EN 50438 [51], ČSN EN 50549-1 [48] a ČSN EN 50549-1 [49], které je nutné vzít v úvahu při definování požadavků na VM.

ČSN EN 50438 uvádí požadavky na paralelní připojení mikrogenerátorů s veřejnými distribučními sítěmi nízkého napětí. Tato norma rovněž rozděluje zdroje na SVM a NVM (s jinou terminologií) a mimo jiné jsou zde definovány pracovní oblasti obou typů VM. Relevantní pro praktickou část této práce je informace o požadavcích na VM dodávající činný výkon menší než 20 % svého nominálního výkonu, kdy v tomto případě nesmí jalový výkon zdroje překročit 10 % velikosti nominálního činného výkonu. Při práci VM s výkonem vyšším než 20 % platí pro SVM povinnost mít schopnost regulovat účinník od 0,95 ind. do 0,95 kap. při odchylce napětí v místě připojení od jmenovitého napětí v mezích -15 % až +10 %. Pro NVM je od stejného výkonu pracovní oblast vymezena účinníkem od 0,9 ind. do 0,9 kap. Pro NVM pak dále norma definuje tři způsoby řízení (možnosti regulace) jalového výkonu:

- $\cos \varphi = \text{kons.}$,
- $\cos \varphi = f(P)$ a
- $Q = f(U)$.

Charakteristika poslední jmenované možnosti ($Q = f(U)$) může vypadat obdobně jak na obr. 3-17 v kapitole PPDS 9.4.2 (na straně 68). Dle normy mají výrobci možnost aplikovat do systému řízení VM funkci závislosti velikosti dodávaného činného výkonu na napětí v místě připojení zdroje ($P = f(U)$), která se uplatní při zvýšení napětí (– předcházení odpojení zdroje).

ČSN EN 50549 ve svých dvou částech definuje požadavky na paralelně připojené výrobní s distribučními soustavami nn (část 1), resp. vn (část 2) pro VM typů A a B. Norma definuje požadavek na schopnost provozu VM v rozsahu napětí v místě připojení od 85 % do 110 % jmenovitého napětí zdroje. Dále jsou zde podobně jako v PPDS definovány požadavky na odolnost vůči krátkodobému podpětí (UVRT – Under Voltage Ride Through) a krátkodobému přepětí

(OVRT - Over Voltage Ride Through). Schopnost regulace jalového výkonu je požadován pro výkony VM vyšší než 10 % činného výkonu zdroje, v rozmezí od 0,9 ind. do 0,9 kap. Norma pak dále definuje čtyři způsoby řízení jalového výkonu:

- $Q = \text{kons.}$,
- $Q = f(U)$,
- $\cos \varphi = \text{kons. a}$
- $\cos \varphi = f(P)$.

Podobně jako u předchozí normy, i zde je ze stejného důvodu možno aplikovat funkci $P = f(U)$.

3.1.1 Požadavky na výrobní moduly dle RfG, PPDS a kodexu PS

Kapitoly odkazované v této části práce se vážou k RfG jako celku [1], příloze 4 PPDS (Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulčních zařízení se sítí provozovatele distribuční soustavy) [47] a části 1 Kodexu PS (Základní podmínky pro užívání přenosové soustavy – Podmínky pro provoz přenosové soustavy a připojování k přenosové soustavě) [2].

RfG

RfG [1] definuje/stanovuje požadavky na PPS, PDS, provozovatele VM a samotné VM. Nejrelevantnější části RfG s ohledem na zaměření této práce jsou informace uvedené v tab. 3-2. Jedná se o výčet informací uvedených v kapitolách 1, 2 resp. 3 – obecné požadavky, požadavky na synchronní VM resp. požadavky na nesynchronní VM typů A, B, C a D. V tab. 3-2 jsou dále v popisu uvedeny odkazy na konkrétní kapitoly v příloze 4 PPDS [47] a části 1 Kodexu PS [2], které jsou popsány dále v této podkapitole. V kodexu PS jsou stanoveny a rozvedeny další požadavky na VM na území ČR, které jsou součástí RfG, nikoliv však PPDS.

tab. 3-2: Přehled členění RfG s vazbou na PPDS

Hlava	Kapitola	Článek
popis		
Hlava II Požadavky	Kapitola 1 Obecné požadavky	Článek 13 Obecné požadavky na výrobní moduly typu A
1. požadavky týkající se frekvenční stability (rozsahy frekvence, schopnost zdroje zůstat připojen k síti při dané rychlosti změny f^8 (ROCOF)) (PPDS 9.1.1) 2. omezený frekvenčně závislý režim při nadfrekvenci (PPDS 9.3.1) 3. udržování konstantního výkonu na své cílové hodnotě P^9 bez ohledu na změny f 4. regulační oblasti pro přípustné snížení P z maximálního výkonu s klesající f (PPDS 9.3.2) 5. podmínky pro stanovování přípustného snížení P z maximálního výkonu (PPDS 9.3.2) 6. vybavenost logickým rozhraním 7. podmínky pro automatické připojování se k soustavě		
Hlava II Požadavky	Kapitola 1 Obecné požadavky	Článek 14 Obecné požadavky na výrobní moduly typu B
1. splnění požadavků stanovených v článku 13 (s výjimkou čl. 13 odst. 2 písm. b)) 2. požadavky týkající se frekvenční stability (rozhraní pro pokyny, dálkové ovládání) (PPDS 9.3.4) 3. požadavky týkající se robustnosti (překlenutí poruchy) 4. požadavky týkající se obnovy provozu soustavy (podmínky pro znovupřipojení, automatika opětovného připojení)		

⁸ f – frekvence

⁹ P – činný výkon

5. požadavky na obecné řízení soustavy (regulační schémata a nastavení, systémy a nastavení elektrických ochranných hierarchií, priorít řízení a ochranných, výměna informací)		
Hlava II Požadavky	Kapitola 1 Obecné požadavky	Článek 15 Obecné požadavky na výrobní moduly typu C
1. splnění požadavků stanovených v člancích 13 a 14 (s výjimkou čl. 13 odst. 2 písm. b)) a odst. 6 a čl. 14 odst. 2) 2. požadavky týkající se frekvenční stability (regulovatelnost P a regulační rozsah, doba dosažení zadané hodnoty P (odchylka a doba), omezený frekvenčně závislý režim při podfrekvenci, provoz ve frekvenčně závislém režimu, regulace s cílem obnovení frekvence, odpojení v důsledku podfrekvence, sledování frekvenčně závislého režimu v reálném čase) (PPDS 9.3.2.1, PPDS 9.3.4, Kodex 4.8) 3. stabilita napětí 4. požadavky týkající se robustnosti (výkonové oscilace, schopnost setrvání připojení k soustavě v mezích stanovených U^{10} a f a během automatických opětných zapnutí) 5. požadavky týkající se obnovy provozu soustavy (start ze tmy, podílení se na OP, rychlé opětovné přifázování) (PPDS 9.2.2.4, PPDS 9.2.2.5) 6. požadavky na obecné řízení soustavy (ztráta úhlové stability nebo ztráta regulace, přístrojové vybavení, simulační modely, instalace zařízení pro zajištění provozu a bezpečnosti provozu soustavy, koordinace s příslušným PPS, uspořádání uzemnění nulového bodu) (PPDS 9.3.4)		
Hlava II Požadavky	Kapitola 1 Obecné požadavky	Článek 16 Obecné požadavky na výrobní moduly typu D
1. splnění požadavků uvedených v článku 13, 14 a 15 (s výjimkou čl. 13 odst. 2 písm. b), odst. 6 a 7, čl. 14 odst. 2) a čl. 15 odst. 3) 2. požadavky týkající se stability napětí (rozsahy napětí, koordinaci s příslušným PPS, stanovení U v místě připojení pro automatické odpojení) 3. požadavky týkající se robustnosti (překlenutí poruchy, překlenutí poruchy (podmínky před a po poruše), překlenutí poruchy v případě nesymetrických poruch) 4. požadavky na obecné řízení soustavy (fázování, zařízení pro fázování, rozsahy frekvencí pro fázování, nastavení synchronizačních zařízení,		
Hlava II Požadavky	Kapitola 2 Požadavky na synchronní VM	Článek 17 Požadavky na synchronní VM typu B
1. splnění požadavků stanovených v člancích 13 a 14 (s výjimkou čl. 13 odst. 2 písm. b)) 2. další požadavky týkající se stability napětí (dodávka Q^{11} , systém regulace napětí) 3. další požadavky týkající se robustnosti (obnova P po poruše)		
Hlava II Požadavky	Kapitola 2 Požadavky na synchronní VM	Článek 18 Požadavky na synchronní VM typu C
1. splnění požadavků stanovených v člancích 13, 14, 15 a 17 (s výjimkou čl. 13 odst. 2 písm. b) a odst. 6, čl. 14 odst. 2 a čl. 17 odst. 2 písm. a)) 2. další požadavky týkající se stability napětí (dodávka Q, dodávka Q při maximální kapacitě, dodávka Q při nižší než maximální kapacitě) (PPDS 9.2.1.2)		
Hlava II Požadavky	Kapitola 2 Požadavky na synchronní VM	Článek 19 Požadavky na synchronní VM typu D
1. splnění požadavků stanovených v článku 13, 14, 15, 16, 17, 18 (s výjimkou čl. 13 odst. 2 písm. b) a odst. 6 a 7, čl. 14 odst. 2, čl. 15 odst. 3, čl. 17 odst. 2) 2. další požadavky týkající se stability napětí (parametry a nastavení komponentů systému regulace U, specifikace a chování automatického regulátoru U při regulaci U v ustáleném stavu a během přechodných jevů a specifikace a chování systému regulace buzení) 3. dohoda mezi provozovatelem VM a PPS o technických možnostech výrobního modulu (zachování úhlové stability během poruchy)		
Hlava II	Kapitola 3	Článek 20

¹⁰ U – napětí¹¹ Q – jalový výkon

Požadavky	Požadavky na nesynchronní VM	Požadavky na nesynchronní VM typu B
1. splnění požadavků stanovených v článku 13 a 14 (s výjimkou čl. 13 odst. 2 písm. b)) 2. další požadavky týkající se stability napětí (dodávka Q, poskytování rychlého poruchového proudu v případě symetrických (třífázových) a nesymetrických poruch) (PPDS 9.2.2.3) 3. o další požadavky týkající se robustnosti (obnovení činného výkonu po poruše, soulad s dalšími zásadami)		
Hlava II Požadavky	Kapitola 3 Požadavky na nesynchronní VM	Článek 21 Požadavky na nesynchronní VM typu C
1. není-li uvedeno jinak v odst. 3 písm. d) bodě v) musí splňovat požadavky stanovené v článku 13, 14, 15 a 20 (s výjimkou čl. 13 odst. 2 písm. b), čl. 13 odst. 6, čl. 14 odst. 2, čl. 20 odst. 2 písm. a)) 2. další požadavky týkající se frekvenční stability (schopnost zajišťovat umělou setrvačnost během velmi rychlých odchylek frekvence, funkční princip regulačních systémů instalovaných k zajištění umělé setrvačnosti) (Kodex 4.19) 3. další požadavky týkající se stability napětí (dodávka Q, dodávka Q při maximální kapacitě, dodávka Q při nižší než maximální kapacitě, režimy regulace Q, stanovení priorit příspěvků činného nebo Q, regulace tlumení výkonových oscilací) (PPDS 9.2.1.2, PPDS 9.4.1)		
Hlava II Požadavky	Kapitola 3 Požadavky na nesynchronní VM	Článek 22 Požadavky na nesynchronní VM typu D
splnění požadavků stanovených v článku 13, 14, 15, 16 20 a 21 (s výjimkou čl. 13 odst. 2 písm. b) a odst. 6 a 7, čl. 14 odst. 2, čl. 15 odst. 3, čl. 20 odst. 2 písm. a))		

Kapitola 4 hlavy II RfG se týká požadavků na nesynchronní výrobní moduly na moři – toto téma není v rámci této práce řešeno. Hlava III popisuje postup pro vydání provozního oznámení o připojení a analýzy nákladů a přínosů se váže k povinnostem provozovatele VM. Jde o náležitosti spojené s plněním požadavků na VM uvedené v hlavě II. Hlava IV ve své první kapitole popisuje sledování souladu. Pro tuto práci jsou ale stěžejní informace uvedené v 2., 3., 5. a 6. kapitole hlavy IV, které jsou popsány v následující podkapitole 3.1.2.

PPDS v příloze 4 se dále konkretizují požadavky na VM. S ohledem na zaměření této práce jsou relevantní informace, se kterými je nutno pracovat v rámci vytváření modelů, uvedeny v kapitole 9 - Chování výroben v síti. V následujících odstavcích jsou uvedeny a popsány konkrétní požadavky na VM dle přílohy 4 PPDS.

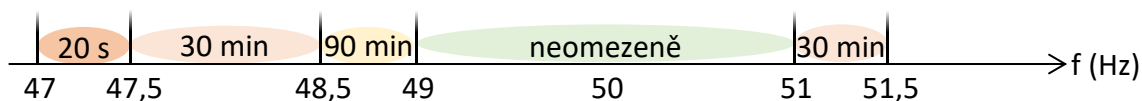
PPDS 9.1.1

Provozní frekvenční rozsah výroben v sítích nn, vn a 110 kV.

Problematika má návaznost na **RfG čl. 13.1 b)**.

Dle RfG není nutno tuto vlastnost ověřovat zkouškou ani simulací.

VM musí zůstat připojeny k síti v rozsahu frekvence 49 až 51 Hz neomezeně. Časy minimální doby připojení při větších odchylkách frekvence je uvedena v obr. 3-2.



obr. 3-2: Provozní frekvenční rozsah VM v sítích nn, vn a 110 kV dle PPDS

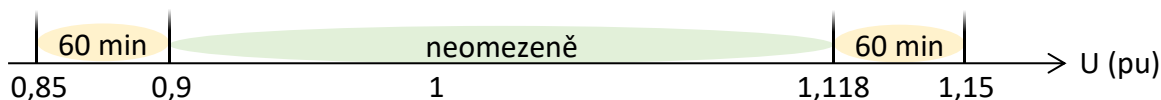
VM se také nesmějí odpojit od sítě v případě změny frekvence menší než ± 2 Hz/s. Tato rychlost změny frekvence – RoCoF (Rate of Change of Frequency) je měřena jako střední hodnota derivace frekvence v časovém intervalu 500 ms.

PPDS 9.1.2

Rozsah trvalého provozního napětí.

VM A1 a A2 připojené do sítě nn musí být schopny trvalého provozu, v době, kdy napětí v místě připojení zůstává v rozsahu $U_n - 15\%$ až $U_n + 10\%$. Pokud je napětí v místě připojení nižší než U_n , je dovoleno snížení výstupního výkonu odpovídající relativní změně napětí $(U_n - U)/U_n$.

VM připojené do sítě vn a 110 kV musí být schopny provozu v mezích a časech udaných na obr. 3-3.



obr. 3-3: Rozsah napětí pro výrobní s připojené do sítě vn a 110 kV dle PPDS

PPDS dále uvádí, že aby bylo možno uvažovat vzrůst a pokles napětí uvnitř instalace a vliv polohy případných odboček transformátoru, musí být pro samotný výrobní modul brán v úvahu širší provozní rozsah.

PPDS 9.2

Zásady podpory sítě.

Následující podkapitoly v rámci kapitoly 9.2 PPDS se zaměřují na požadavky na schopnosti VM podílet se (při dodávce do sítě) na udržování napětí. Přitom se rozlišuje mezi statickou (kap. 9.2.1) a dynamickou (kap. 9.2.2) podporou sítě. Níže uvedené hodnoty a charakteristiky udává PDS, za dodržování zadaných hodnot zodpovídá systém řízení VM. Konkrétní a detailní požadavky na provedení a nastavení je vždy blíže specifikováno ve smlouvě o připojení VM.

PPDS 9.2.1

Statické řízení napětí.

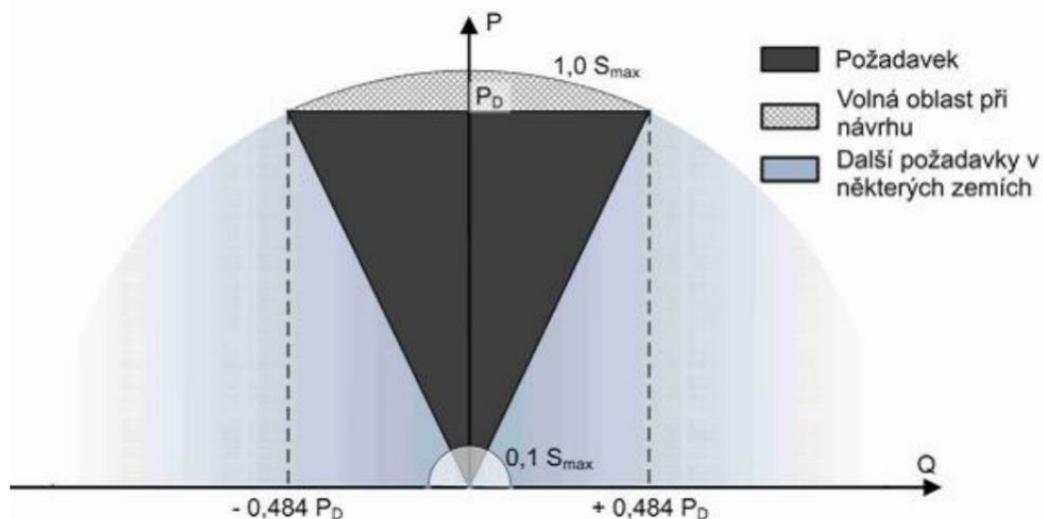
Statické udržování napětí v síti je udržování napětí ve smluvně stanovených mezích za normálního provozu v síti při pomalých změnách napětí. Výkyvy napětí musí zůstávat v povolených mezích. Výrobní moduly a výrobní musí být schopny přispívat k tomuto požadavku během normálního provozu sítě. [47]

Pokud to vyžadují podmínky v síti, a PDS tento požadavek uplatní, musí se výrobní zařízení na statickém udržování napětí podílet pomocí jalového výkonu v rozsahu účinníku výrobní mezi 0,90 kapacitní a 0,90 induktivní dle části 9.4. Výrobna musí být schopna splnit požadavky uvedené níže v celém provozním rozsahu napětí a kmitočtu. [47]

PPDS 9.2.1.1

Podpora napětí pomocí jalového výkonu zdrojů v síti nn.

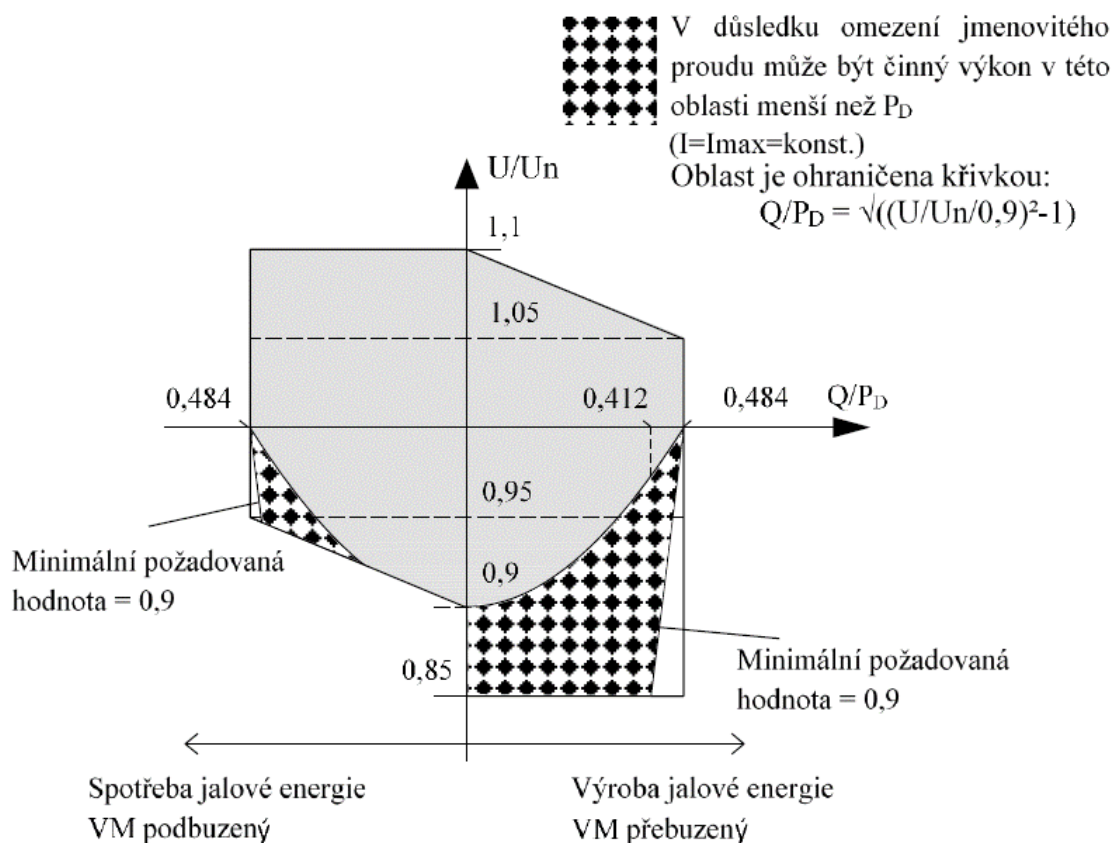
Požadavky minimálních i nepovinných dodávek/odběrů jalového výkonu VM při jmenovitém napětí je uveden v obr. 3-4. Požadavky vychází z FprEN 50549-2 [52].



obr. 3-4: Požadavky na dodávku/odběr jalového výkonu (VM A1) při U_n dle PPDS [47]

Pro výrobny do 800 W podle [51] platí, že účinník mikrogenerátoru za normálních ustálených provozních podmínek v předepsaném tolerančním pásmu jmenovitého napětí musí být vyšší než 0,95, za předpokladu, že výstupní činný výkon mikrogenerátoru je vyšší než 20 % jmenovitého výstupního výkonu jednotky. Nižší výstupní výkon, než 20 % jmenovitého výkonu mikrogenerátoru nesmí způsobit větší jalový výkon než 10 % jeho jmenovitého činného výkonu. [47]

Minimální požadavky na regulaci jalového výkonu pro napětí jiné než jmenovité, ale zároveň v mezích rozsahu pro trvalý provoz jsou uvedeny v obr. 3-5.



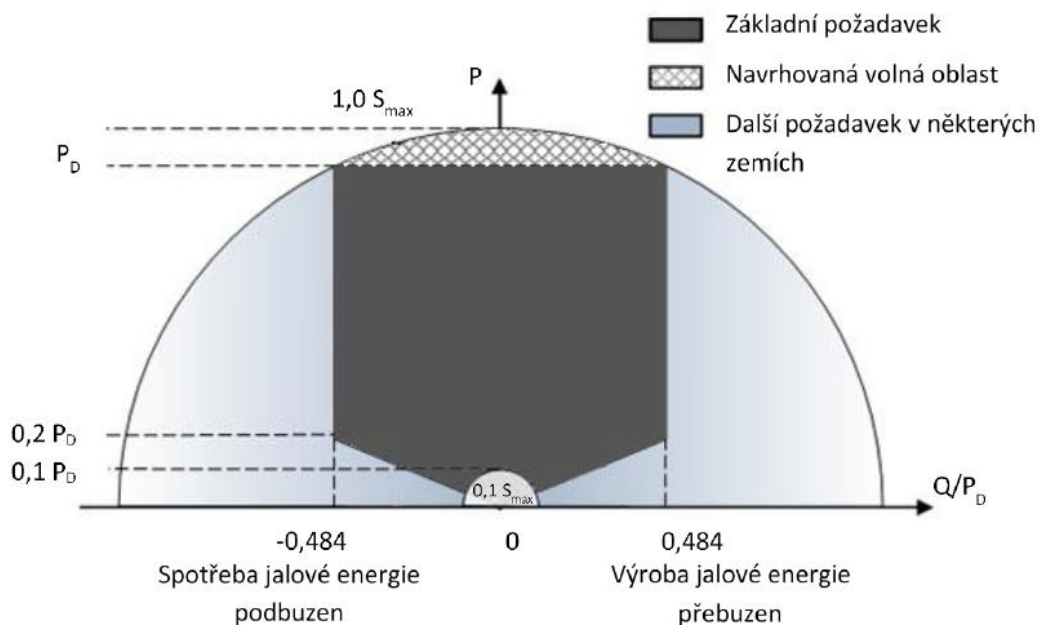
obr. 3-5: Regulace jalového výkonu VM A1 pro $P = P_D$ [47]

PPDS 9.2.1.2

Podpora napětí pomocí jalového výkonu VM A2, B1, B2, C a D.

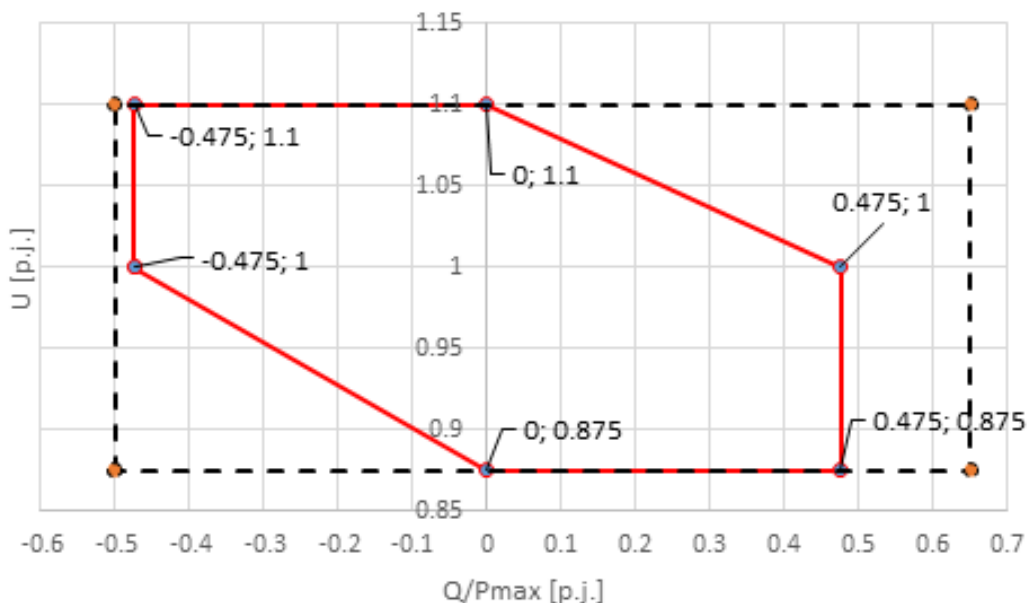
Problematika má návaznost na **RfG čl. 18.2, RfG čl. 21.3 a), b), c), d)**

Požadavky minimálních i nepovinných dodávek/odběrů jalového výkonu VM při jmenovitém napětí je uveden v obr. 3-6. Požadavky vychází z PNE 33 3430-8-1 [53].



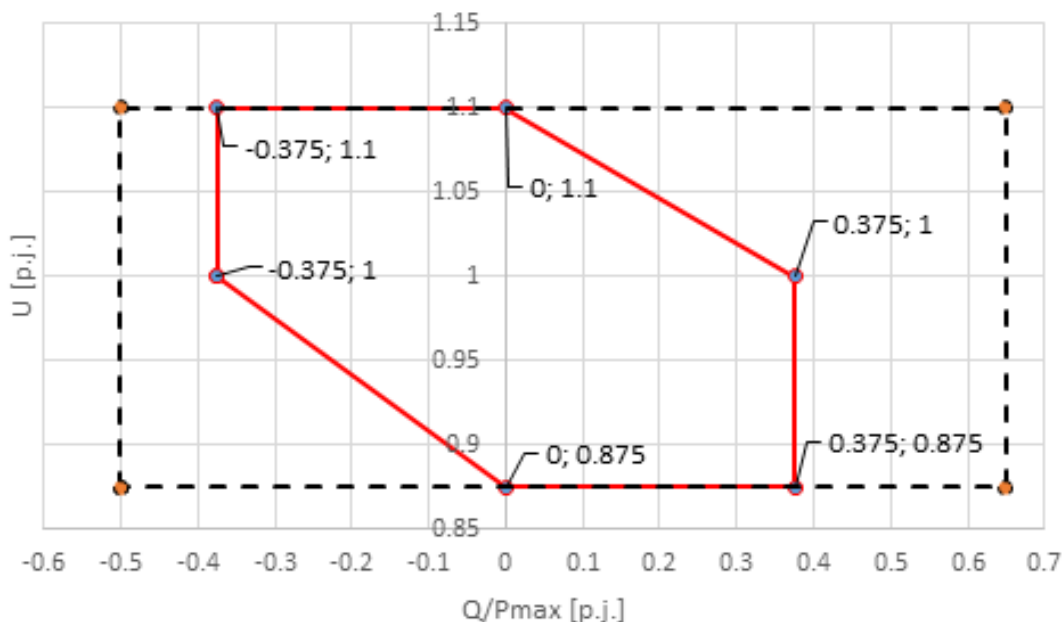
obr. 3-6: Požadavky na dodávku/odběr jalového výkonu (VM A2, B1, B2 a C) při U_n dle PPDS [47]

SVM B2, C a D musí být podle **RfG čl. 18.2** schopen dodávat/odebírat dodatečný jalový výkon. Tento dodatečný jalový výkon kompenzuje nabíjecí výkon vedení nebo kabelu vysokého napětí mezi vysokonapěťovými svorkami blokového transformátoru SVM nebo svorkami jeho alternátoru a místem připojení, pokud blokový transformátor neexistuje, a je dodáván odpovědným vlastníkem tohoto vedení nebo kabelu při dodávce činného výkonu v místě připojení. V případě dodávky maximálního činného výkonu do soustavy musí být výrobní modul schopen pracovat v mezích stanovených v diagramu na obr. 3-7. [47]



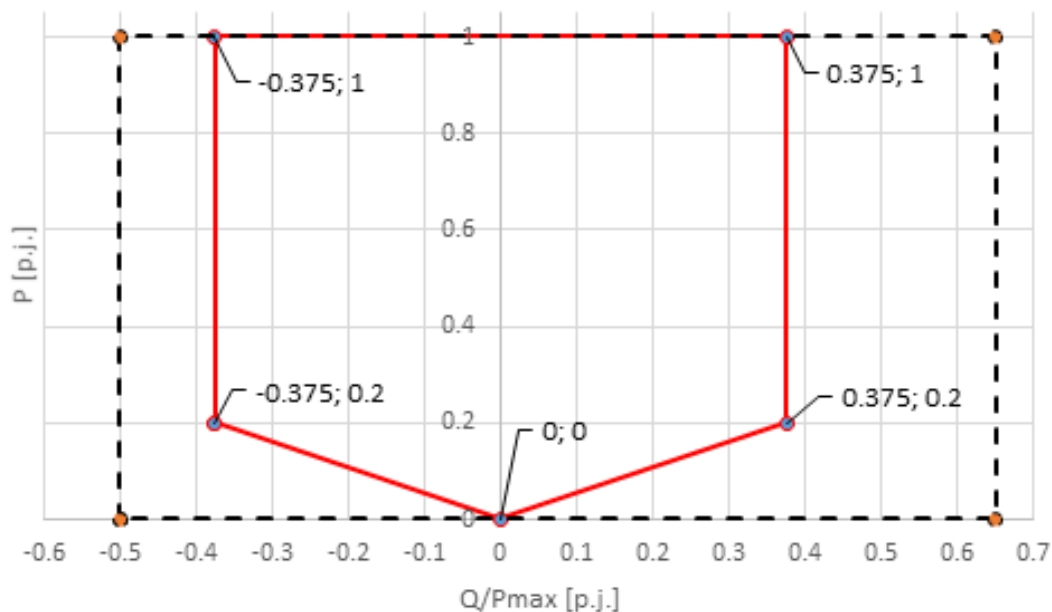
obr. 3-7: Dodávka/odběr jalového výkonu při maximální dodávce činného výkonu u SVM B1, B2, C a D [47]

NVM B2, C a D musí být podle **RfG čl. 21.3 a), b), c)** schopen dodávat dodatečný jalový výkon. Tento dodatečný jalový výkon kompenzuje nabíjecí výkon vedení nebo kabelu vysokého napětí mezi vysokonapěťovými svorkami blokového transformátoru NVM nebo svorkami jeho měniče a místem připojení (pokud blokový transformátor neexistuje), a je dodáván odpovědným vlastníkem tohoto vedení nebo kabelu při dodávce činného výkonu v místě připojení. NVM B2, C a D musí být schopen pracovat při maximálním dodávaném činném výkonu v rámci diagramu na obr. 3-8.



obr. 3-8: Dodávka/odběr jalového výkonu při maximální dodávce činného výkonu u NVM B2, C a D [47]

Při dodávaném výkonu nižším, než je maximální, musí být VM schopen pracovat v rámci diagramu stanoveném na obr. 3-9. V případě, že nejsou k dispozici všechny výrobní bloky dodávající činný výkon v provozu je schopnost dodávky činného a jalového výkonu úměrně nižší.



obr. 3-9: Dodávka/odběr jalového výkonu při nižší než maximální dodávce činného výkonu pro NVM kategorie B2, C a D [47]

NVM B2, C a D musí provést změnu jalového výkonu na 90 % požadované změny bez zpoždění, nejpozději však do $t_1 = 4$ s, s ustálením dle parametrů definovaných v RfG čl. 21.3 d) do $t_2 = 30$ s.

PPDS 9.2.2

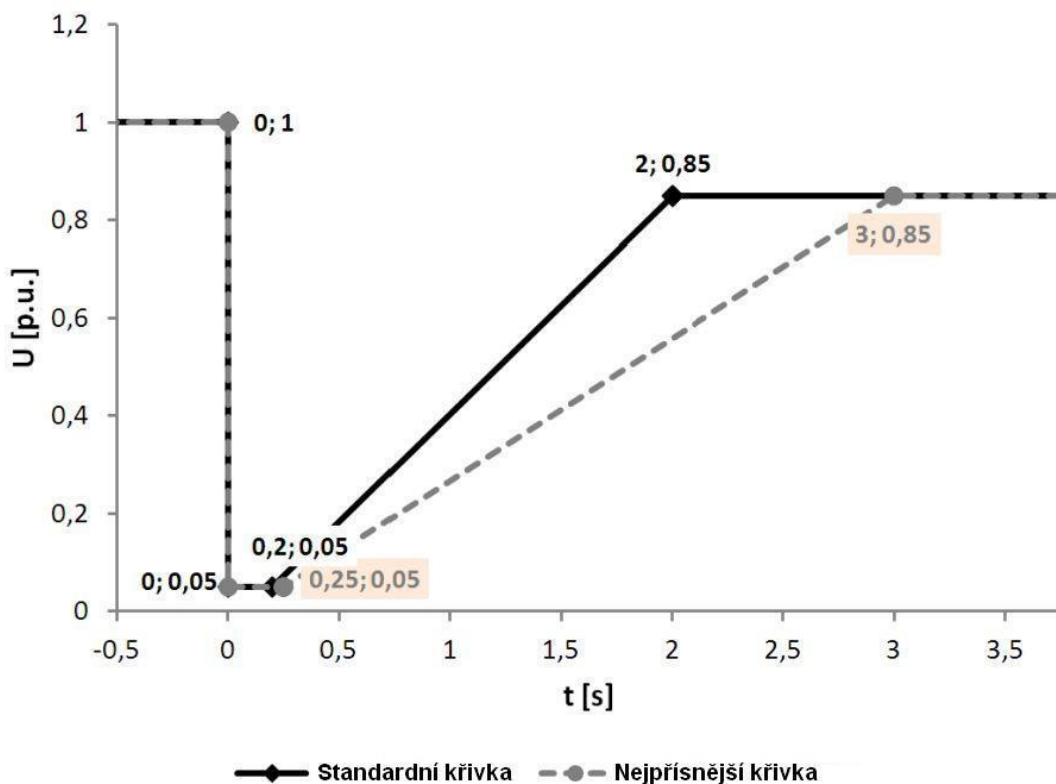
Dynamická podpora sítě.

Dynamická podpora sítě znamená udržování napětí při poklesech napětí v síti vvn a zvn tak aby bylo zamezeno nežádoucímu odpojení VM v sítích nn, vn a bylo tak zamezeno rozpadu sítě. Z toho důvodu se musí i VM výrobny v sítích nn, vn a 110 kV podílet na dynamické podpoře sítě. To klade požadavek na schopnost VM zůstat připojený i při poruchách v síti, při kterých dochází k poklesům napětí. Týká se to všech druhů (1-, 2-, i 3-pólových) zkratů. U VM připojených do sítí nn se hodnotí nejmenší fázové napětí, a pokud není střední vodič, pak nejmenší sdružené napětí. U výroben v sítích vn a 110 kV se hodnotí nejmenší sdružené napětí.

PPDS 9.2.2.1

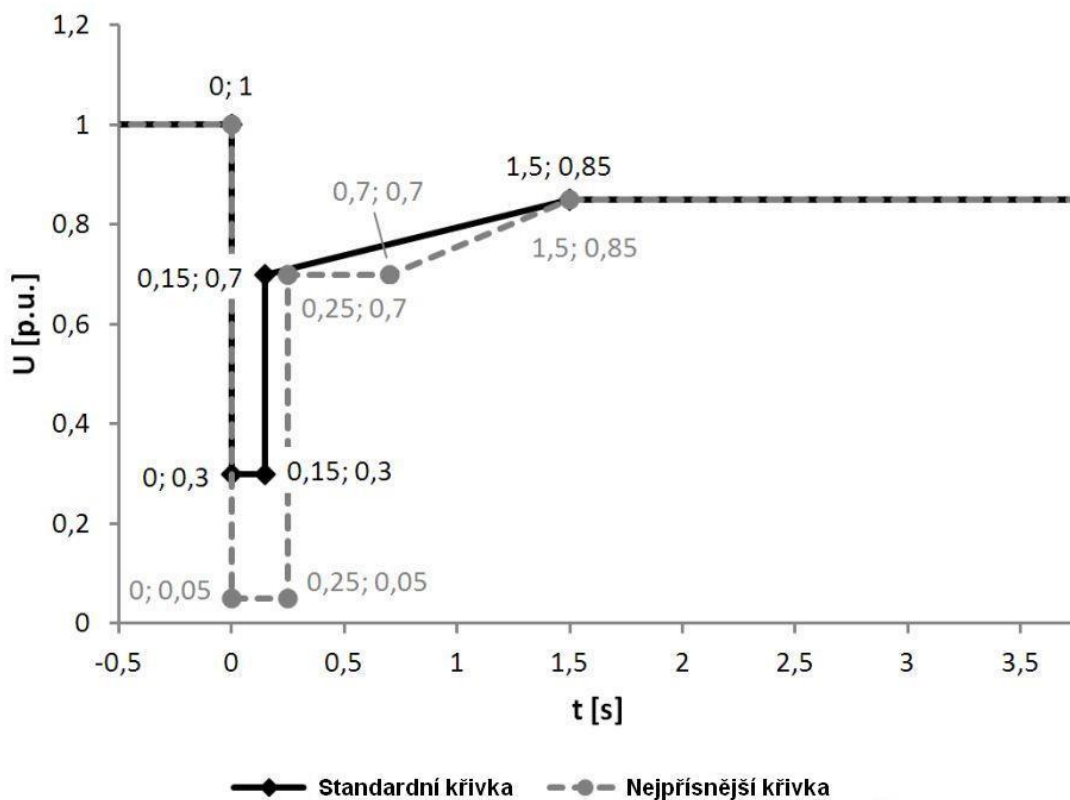
Překlenutí poruchy při krátkodobém poklesu napětí (Low voltage ride through - LVRT).

Pro NVM platí parametry pro překlenutí poruchy uvedené v obr. 3-10.



obr. 3-10: Schopnost překlenutí poruchy pro výrobní se střídačem na výstupu [47]

Pro SVM platí parametry pro překlenutí poruchy uvedené v obr. 3-11.



obr. 3-11: Schopnost překlenutí poruchy přímo připojených generátorů [47]

Jde-li o připojení do sítě s opětovným zapínáním, pak k odpojení musí dojít v průběhu beznapěťové pauzy. Nastavení ochran výroben musí být koordinováno s požadovanými hodnotami

na obr. 3-10 a obr. 3-11, aby jednak nedocházelo k ohrožení zařízení VM, a jednak k jejich předčasnému odpojení. [47]

PPDS 9.2.2.2

Překlenutí poruchy při krátkodobém nadpětí (HVRT).

VM musí být schopny zůstat připojeny, pokud napětí na vývodech nepřekročí horní mez rozsahu napětí pro trvalý provoz až do úrovně 120 % dohodnutého napětí po dobu 1 s, a 115 % deklarovaného napětí po dobu 60 s. [47]

U sítí nn musí být vyhodnoceno nejvyšší fázové napětí, nebo tam kde není dostupné fázové nejvyšší sdružené napětí, zatímco u sítí vysokého napětí a 110 kV musí být vyhodnoceno nejvyšší sdružené napětí. [47]

Jde-li o připojení do sítě s opětným zapínáním, pak k odpojení musí dojít v průběhu beznapěťové přestávky. PDS stanoví, které výroby se podle jejich předpokládaných technických možností musí podílet na dynamické podpoře sítě. To se děje zadáním nastavení pro rozpadovou síťovou ochranu. [47]

PPDS 9.2.2.3

Požadavky na zkratový proud NVM.

Problematika má návaznost na **RfG čl. 20.2 b), c)**

NVM B1, B2 C a D musí být podle **RfG čl. 20.2 b), c)** RfG schopen aktivovat dodávku zkratového proudu, a to buď:

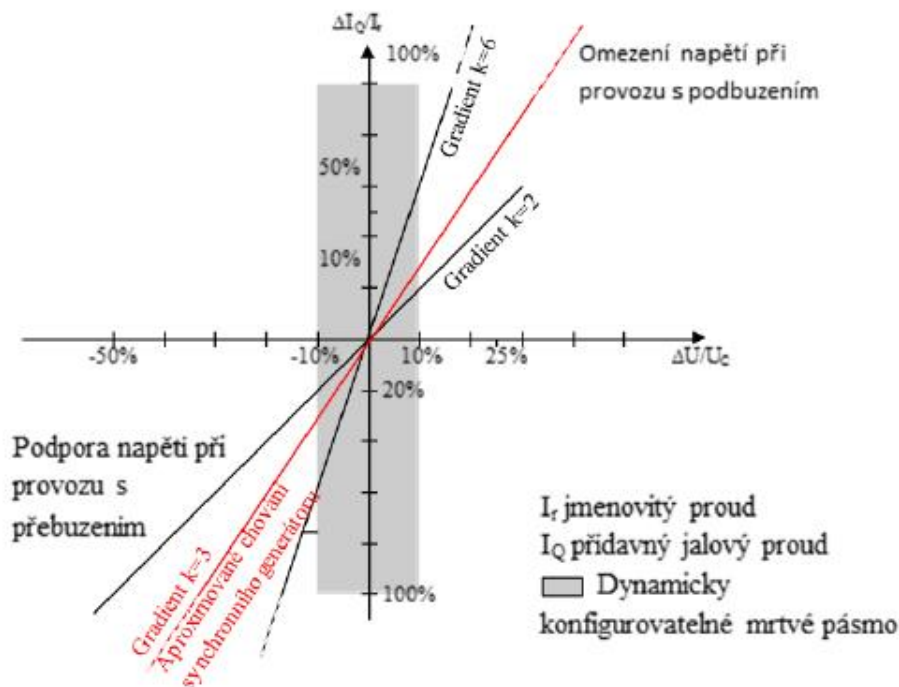
- zajištěním dodávky rychlého poruchového proudu v místě připojení, nebo
- měřením odchylek napětí na svorkách jednotlivých bloků NVM a dodáním rychlého poruchového proudu na svorky těchto bloků.

Porucha je identifikována pokud $U_{akt} < 0,9 U_n$ nebo $U_{akt} > 1,1 U_n$. (U_{akt} je aktuální napětí v místě připojení VM). Konec poruch je identifikován zpětným překročením meze napětí pro identifikaci poruchy. Poruchový proud je dán rovnicí:

$$\Delta_i = k \cdot \Delta_u \quad (3.1)$$

kde k je koeficient vyjadřující dosah proudu jalového charakteru (závislý především na poměrném napětí nakrátko (u_k) transformátoru), $k \in [2; 6]$; Δ_i je příspěvek okamžité hodnoty proudu v procentech jmenovitého proudu; Δ_u je odchylka napětí od jmenovité hodnoty v procentech. Doba odezvy musí být ≤ 30 ms a doba ustálení ≤ 60 ms.

Princip podpory sítě NVM zkratovým proudem je uveden na obr. 3-12.



obr. 3-12: Princip podpory napětí sítě zkratovým proudem nesynchronními VM [47]

PPDS 9.2.2.4

Schopnost startu ze tmy.

Problematika má návaznost na **RfG čl. 15.5 a).**

Tato schopnost VM není povinná. Pokud však bude tato schopnost požadována a smluvně sjednána mezi PDS a vlastníkem VM, musí VM typu C a D zahájit dodávku činného výkonu do vydělené části DS do 30 minut bez jakékoliv vnější dodávky elektrické energie. Pro VM B2 bude schopnost startu ze tmy požadována výběrově po vzájemném odsouhlasení PDS a vlastníka VM.

PPDS 9.2.2.5

Schopnost ostrovního provozu.

Problematika má návaznost na **RfG čl. 15.5 b).**

V návaznosti na **RfG čl. 15.5 b) i)** musí být VM C a D schopny podílet se na ostrovním provozu (OP), vyžádá-li si to příslušný PDS v koordinaci s příslušným PPS. V takovém případě musí být frekvenční limity pro OP stejné jako limity v části 9.1.1 (v souladu s **RfG čl. 13.1 a)**) a zároveň napěťové limity stejné jako limity zavedené v části 9.1.2 (v souladu s **RfG čl. 15.3** nebo případně **RfG čl. 16.2**).

V návaznosti na **RfG čl. 15.5 b) ii)** musí být VM C a D schopny pracovat během OP ve frekvenčně závislém režimu FSM (v souladu s **RfG čl. 15.2 d)**). V případě přebytku výkonu musí být VM schopny snížit činný výkon na výstupu v rámci provozního P-Q diagramu. V souvislosti s tím musí být VM schopen snížit činný výkon na výstupu v takovém rozsahu, nakolik je to technicky možné, avšak alespoň na 55 % své maximální kapacity.

V návaznosti na **RfG čl. 15.5 b) iii)** musí být způsob detekce přechodu ze synchronního provozu na OP dohodnut mezi vlastníkem VM a příslušným PDS v koordinaci s příslušným PPS.

Dohodnutý způsob detekce nesmí být založen pouze na stavových signálech spínacích zařízení provozovatele soustavy.

Způsob detekce přechodu na OP VM C a D je dán změnou průběhu frekvence a napětí. Frekvence a napětí je monitorována pro identifikace přechodu z tvrdé soustavy do OP. Přechod do OP je detekován jednoznačně dosažením odchylky frekvence ± 200 mHz bez záměrného zpoždění. [47]

Zařízení uživatelů s výrobkami elektrické energie, které při poruchách v napájecí síti přejdou pro pokrytí vlastní spotřeby do OP, se musí až do odpojení od sítě PDS podílet na podpoře sítě. Zamýšlený OP je zapotřebí odsouhlasit s PDS v rámci požadavku na připojení. [47]

PPDS 9.2.2.6

Schopnost rychlého přifázování.

VM C a D musí mít schopnost v případě potřeby pracovat po dobu alespoň 2 hodin na vlastní spotřebě, než dojde k trvalému odstavení VM z provozu.

PPDS 9.3.1

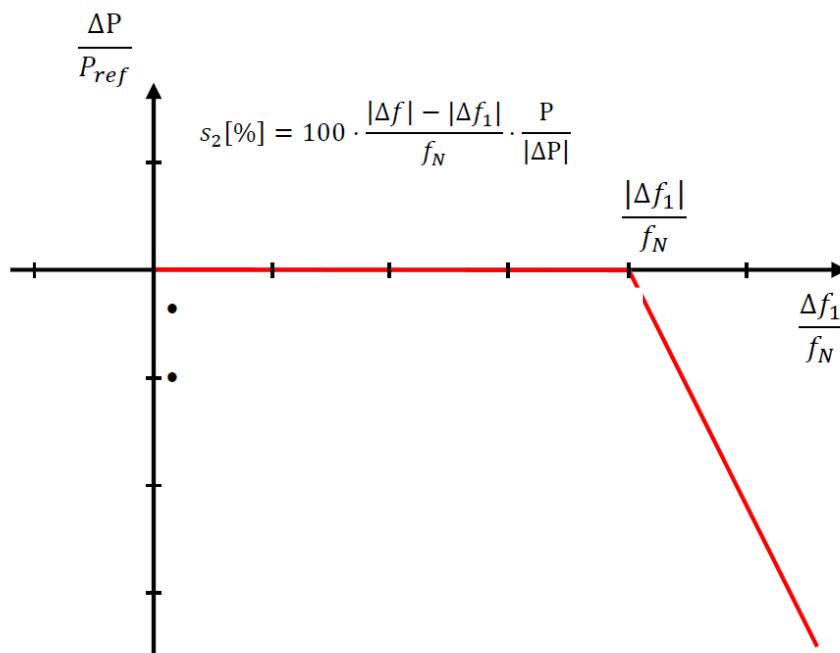
Snížení činného výkonu při nadfrekvenci.

Problematika má návaznost na **RfG, čl. 13.2.**

Dle RfG (viz tab. 3-4 (strana 74)) je nutno tuto vlastnost ověřit:

- zkouškou podle čl. 44.2 pro SVM typu B, C a D nebo
- simulací podle čl. 51.2 pro SVM typu B, C a D,
- zkouškou podle čl. 47.2 pro NVM typu B, C a D nebo
- simulací podle čl. 54.2 pro NVM typu B, C a D.

VM musí být schopen snižovat výkon při nadfrekvenci v síti od zadané prahové hodnoty Δf_1 podle nastavené statiky s_2 . Dle RfG musí být prahová hodnota frekvence Δf_1 v intervalu 50,2 Hz až 50,5 Hz. Defaultní hodnota Δf_1 pro ČR dle PPDS je 50,2 Hz. Nastavení statiky s_2 musí být dle RfG v intervalu 2 % až 12 %. Defaultní hodnota s_2 pro ČR dle PPDS je 5 %. Závislost požadované frekvenční odezvy P při nadfrekvenci je zobrazena na obr. 3-13.



obr. 3-13: Požadovaná frekvenční odezva P u VM v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci. [47]

P_{ref} a P je referenční činný výkon, ke kterému je vztažena ΔP , což je změna činného výkonu na výstupu VM. Pro synchronní VM je P_{ref} jeho maximální kapacita, pro nesynchronní VM je P_{ref} jeho maximální kapacita nebo skutečný činný výkon VM v čase překročení prahové hodnoty Δf_1 (– určí PPS). f_n je jmenovitá frekvence (50 Hz), Δf je odchylka frekvence v síti, Δf_1 je již zmíněná prahová hodnota pro omezovací regulaci zdroje a s_2 statika.

S požadavkem na tuto funkcionalitu souvisí poslední odstavec PPDS 9.3.4, který uváží, že po omezení činného výkonu způsobeným nárůstem frekvence může být činný výkon zpět zvyšován teprve po návratu frekvence na hodnotu 50,1 Hz.

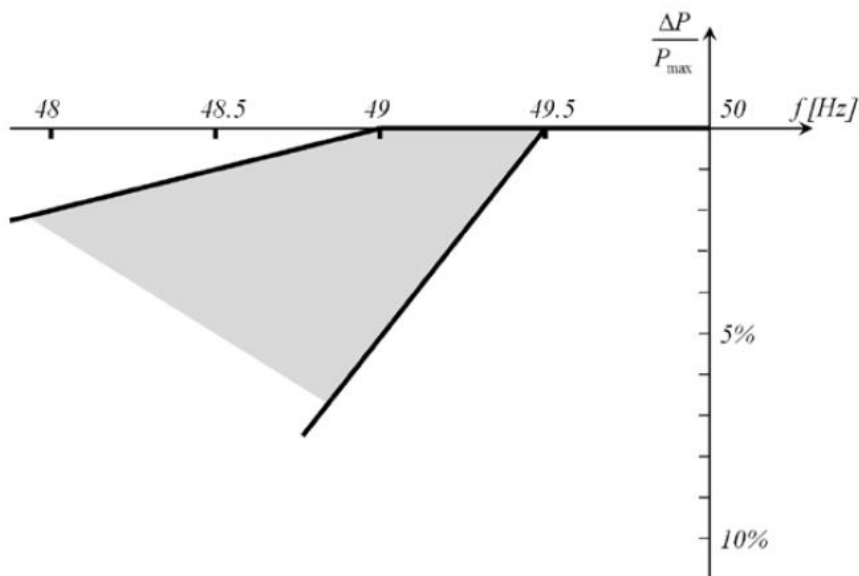
PPDS 9.3.2

Snížení činného výkonu při podfrekvenci.

Problematika má návaznost na **RfG, čl. 13.4 a čl. 13.5**.

Dle RfG není nutno tuto vlastnost ověřovat zkouškou ani simulací.

PPS musí dle PPDS definovat dovolené snížení činného výkonu z maximální hodnoty při snižující se frekvenci v rozsahu podle grafu na obr. 3-14. Míra snižování výkonu stanovená PPS musí být v mezích zvýrazněné plochy v obr. 3-14. Meze jsou dle **RfG čl. 13.4 a), b)** definovány jako klesání o 2 % maximální kapacity (při 50 Hz) na každý pokles frekvence o 1 Hz při poklesu frekvence v síti pod 49 Hz a klesání o 10 % kapacity na pokles o 1 Hz při poklesu pod 49,5 Hz.



obr. 3-14: Maximální snížení činného výkonu s klesající frekvencí [47]

Tento požadavek se nevztahuje přímo k možnostem řízení VM, ale k robustnosti VM. Požadavek na korekci činného výkonu při klesající frekvenci je definován v kapitole PPDS 9.3.2.1.

PPDS 9.3.2.1

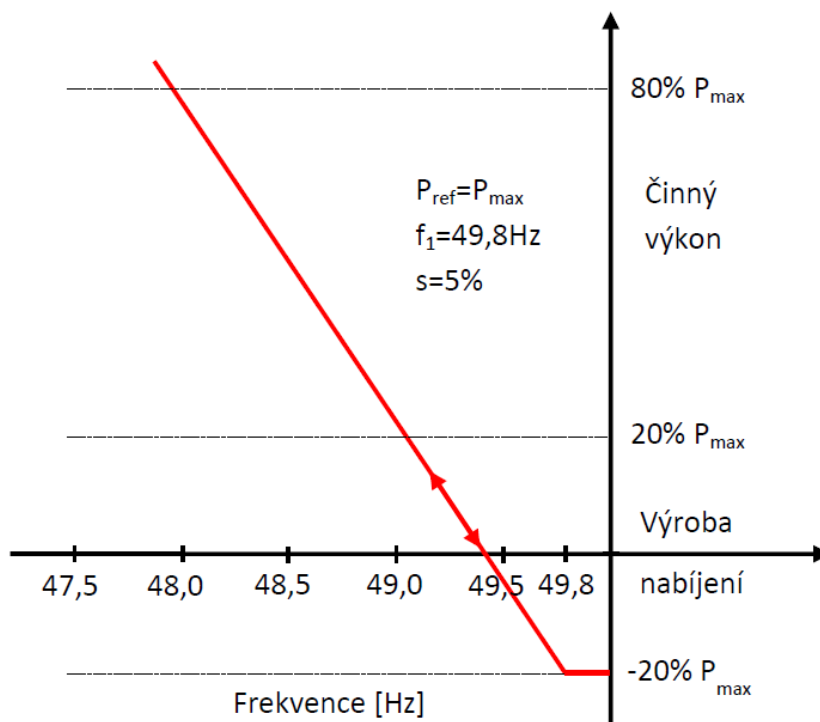
Frekvenční odezva činného výkonu akumulárního zařízení při podfrekvenci.

Problematika má návaznost na **RfG, čl. 13.2 c)**.

S frekvenční odezvou činného výkonu při podfrekvenci je v PPDS uvažováno u akumulárních zařízení, kdy elektrické akumulární zařízení ve výrobě musí být schopné aktivace odezvy činného výkonu na podfrekvenci. U bateriových akumulárních zařízení musí být frekvenční odezva poskytována při nabíjení i v režimu dodávky.

Odezva činného výkonu na podfrekvenci musí být poskytována při programovatelné mezi frekvence, minimálně mezi 49,8 Hz a 49,5 Hz včetně, při programovatelné statice v rozsahu minimálně od 2 % do 12 %. Referenční výkon P_{ref} je P_{\max} . VM musí být schopen aktivace frekvenční odezvy činného výkonu na podfrekvenci tak rychle, jak je to technicky možné, s vlastním zpožděním do 2 s a odezvou maximálně 30 s. Přídavné zpoždění musí být programovatelné k nastavení zpoždění na hodnotu mezi vnitřním zpožděním a 2 s. Po aktivaci musí frekvenční odezva činného výkonu používat aktuální hodnotu frekvence a reagovat na její vzrůst nebo snížení podle naprogramované statiky s přesností $\pm 10\%$ jmenovitého výkonu. Nepřesnost měření frekvence musí být do ± 10 mHz.

Nastavení mezní frekvence f_l , statiky a přídavného zpoždění definuje PDS. Pokud nejsou definovány, funkce musí být zablokována.



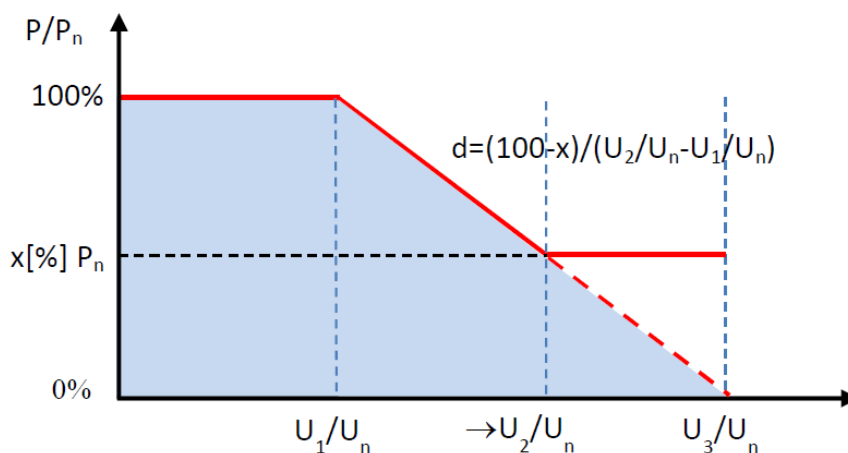
obr. 3-15: Frekvenční odezva činného výkonu na podfrekvenci u akumulčního zařízení [47]

PPDS 9.3.3

Snížení činného výkonu závislé na napětí – funkce $P(U)$.

Problematika nemá přímou návaznost na RfG.

S odkazem na ČSN EN 50 438 ed.2 [51] a ČSN EN 50549-2 [52] je kladen na některé VM požadavek na řízení napětí činným výkonem. Průběh závislosti změny činného výkonu na velikosti napětí je uveden na obr. 3-16. Důvodem možné aplikace této funkcionality je snaha zabránit odpojení VM v případě zvýšeného napětí. PPDS dále připouští, že je-li tato funkce aktivována, mohou VM snižovat svůj výkon podle výrobcem zvolené logiky, nicméně změna výkonu VM nesmí být měněna skokově (po krocích) nebo být kmitavá.



obr. 3-16: Charakteristika funkce $P(U)$ [47]

PPDS konkrétně nedefinuje body x , U_1 , U_2 a U_3 – to je ponecháno na příslušném PDS, v závislosti na místě připojení VM.

PPDS 9.3.4

Řízení činného výkonu v závislosti na provozních podmínkách.

Problematika má návaznost na **RfG, čl. 14.2**.

Dle RfG není nutno tuto vlastnost ověřovat zkouškou ani simulací.

Tento požadavek dává PDS právo omezit výkon VM dálkovým povel. PDS je k tomuto kroku oprávněn v případech, kdy (1) existuje potenciální ohrožení bezpečného provozu systému (např. při předcházení stavu nouze a při stavech nouze), (2) je nutné provést určité provozní práce, popř. hrozí-li nebezpečí přetížení v síti PDS, (3) hrozí-li nebezpečí vzniku ostrovního provozu, (4) dochází-li k ohrožení statické nebo dynamické stability, (5) je zaznamenán vzrůst frekvence ohrožující systém nebo (6) je nutná údržba nebo provedení stavebních prací na zařízení DS nebo v jeho blízkosti. Snížení výkonu dodávaného VM na hodnotu požadovanou PDS musí být neprodlené, maximálně v průběhu jedné minuty, ale do 5 s po obdržení pokynu na vstupním portu výrobního modulu.

Tento požadavek je také v souladu s **RfG čl. 15.2 a), b)** – požadavek na možnost zadání výkonu VM dálkově.

Doba, za niž musí být požadovaná hodnota činného výkonu dosažena je 5 minut pro SVM, resp. 1 minuta pro NVM a přípustná odchylka skutečného od požadovaného výkonu zdroje musí být menší než 5 %.

S ohledem na rychlost změny výkonu musí VM v souladu s **RfG čl. 15.6 e)** být schopny zvyšovat výkon s gradientem alespoň 2 % $P_n/\text{min.}$, ale ne rychleji než 40 % $P_n/\text{min.}$ a snižovat výkon s gradientem alespoň -2 % $P_n/\text{min.}$, ale ne rychleji než -40 % $P_n/\text{min.}$

Po omezení činného výkonu způsobeným nárůstem frekvence může být činný výkon zpět zvyšován teprve po návratu frekvence na hodnotu 50,1 Hz. Rozsah necitlivosti musí být do 10 mHz.

PPDS 9.4.1

Způsoby řízení jalového výkonu.

Problematika má návaznost na **RfG, čl. 21.3 d)**.

Dle RfG (viz tab. 3-4 (strana 74)) je nutno tuto vlastnost ověřit:

- zkouškou podle čl. 48.7 pro NVM typu C a D (regulace U),
- zkouškou podle čl. 48.8 pro NVM typu C a D (regulace Q),
- zkouškou podle čl. 48.9 pro NVM typu C a D (regulace účinníku).

Možnosti řízení jalového výkonu vyplývají z RfG a norem ČSN EN 50 438 ed.2 [51], FprEN 50549-2 [52] a PNE 33 3430-8-1 [53] a pro konkrétní VM ho určuje PDS po konzultaci s výrobcem. Požadovaný rozsah jalového výkonu či účinníku VM je uveden v kapitole PPDS 9.2.1. PDS také udává typ zadání žádané hodnoty jalového výkonu podle potřeb provozu sítě (individuálně pro každý VM). Toto zadání, odvíjející se i od technických možností VM, může být dohodou na hodnotě či harmonogramu nebo on-line zadáváním.

Jalový výkon musí být říditelný u VM s instalovaným výkonem 100 kVA a vyšším. Rozsah účinku mezi 0,9 induktivní a 0,9 kapacitní musí být využitelný kdykoliv. Řízení účinníku mimo tento rozsah může být mezi výrobcem a PDS smluvně dohodnuto, v rámci poskytování podpůrné služby.

Při provozu zdroje je velikost nebo poměr jalového výkonu zadán PDS buď pevnou hodnotou nebo dálkově nastavenou žádanou hodnotou. Tato žádaná hodnota je:

- pevná hodnota jalového výkonu (Q fix),
- hodnota jalového výkonu závislá na napětí ($Q(U)$),
- hodnota jalového výkonu závislá na činném výkonu ($Q(P)$),
- pevná hodnota účinníku ($\cos\varphi$ fix),
- hodnota účinníku závislá na napětí ($\cos\varphi(U)$),
- hodnota účinníku závislá na činném výkonu ($\cos\varphi(P)$) nebo
- zadaná hodnota napětí.

Pokud PDS zadá charakteristiku závislosti jalového výkonu, musí být VM schopen nastavit odpovídající ustálenou hodnotu jalového výkonu do 10 s – pro charakteristiku $\cos\varphi = f(P)$, resp. mezi 10 až 60 s (zadá PDS) – pro charakteristiku $Q(U)$.

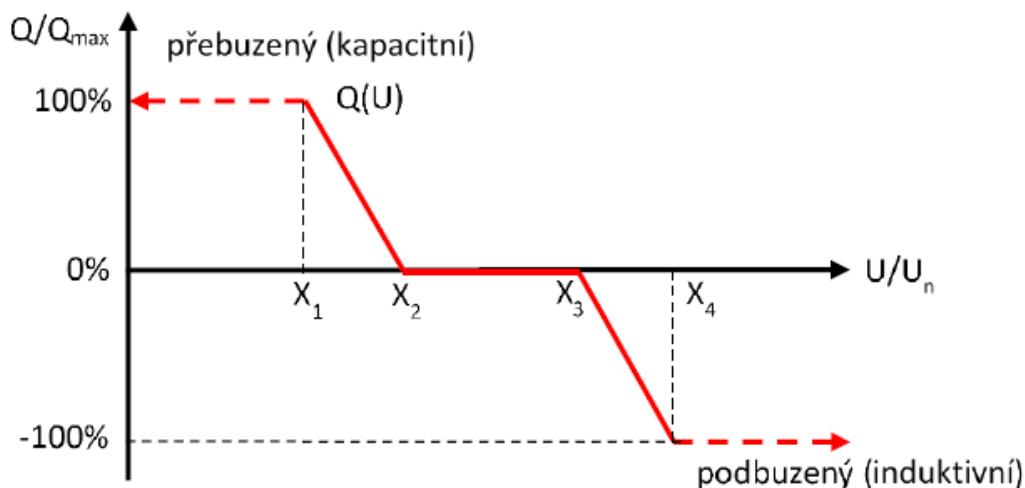
NVM (B2, C a D) musí být schopny dle **RfG čl. 21.3 d)** provést změnu jalového výkonu na 90 % požadované hodnoty v časovém rozmezí 1 až 5 s – PPDS stanovují tento $t_1 = 4$ s a skutečná hodnota se musí ustálit na nové hodnotě v časovém rozmezí 5 až 60 s – PPDS stanovují tento $t_2 = 30$ s.

PPDS 9.4.2

Jalový výkon závislý na napětí – funkce $Q(U)$

Problematika má návaznost na **PPDS 9.4.1**.

Křivka závislosti velikosti jalového výkonu na napětí v místě připojení zdroje je uvedena na obr. 3-17. Funkce je definována čtyřmi body, jejichž nastavení určuje PDS podle místních síťových podmínek, ev. studie připojitelnosti.



obr. 3-17: Charakteristika funkce $Q(U)$ [47]

Popis jednotlivých bodů je dle [47] následující:

- bod X_1 : hodnota poměru U/U_n (< 1), které odpovídá maximální dodávaný jalový výkon výroby, pro zvýšení hodnoty napětí v místě připojení,
- bod X_2 : hodnota poměru U/U_n (< 1), která je počáteční hodnotou pro dodávku jalového výkonu pro zvýšení napětí v místě připojení,

- bod X₃: hodnota poměru $U/U_n (> 1)$, která je počáteční hodnotou odběru jalového výkonu pro snížení napětí v místě připojení a
- bod X₄: hodnota poměru $U/U_n (> 1)$, které odpovídá maximální odebíraný jalový výkon výrobní, pro snížení hodnoty napětí v místě připojení.

Při nastavování parametrů charakteristiky $Q(U)$ je nutné brát ohled na velikost napětí v místě připojení VM a vhodně nastavit strmosti regulace s ohledem na pohyb napětí podél vývodů vlivem dodávky výkonů VM.

Po skokové změně napětí musí NVM být schopen dosáhnout 90 % změny jalového výkonu na výstupu do doby t_1 , kterou stanoví příslušný PDS v rozpětí 1 až 5 s, a musí se ustálit na hodnotě stanovené pomocí strmosti do doby t_2 stanovené příslušným provozovatelem soustavy v rozpětí 5 až 60 s, s přípustnou odchylkou jalového výkonu v ustáleném stavu nejvýše 5 % maximálního jalového výkonu. Časové hodnoty stanoví příslušný PDS.

PPDS 9.5

Automatické opětovné připojení výroben.

Problematika má návaznost na **RfG, čl. 13.7**.

Dle RfG není nutno tuto vlastnost ověřovat zkouškou ani simulací.

Automatické připojení je povoleno, pokud ho příslušný PDS nezakáže v závislosti na provozních podmínkách sítě.

VM typů A1, A2, B1, B2 a C a podle [51] navíc i zdroje do 800 W odpojené od sítě z důvodu odchylky napětí či frekvence mohou být opětovně automaticky připojeny k DS je po dobu 5 minut napětí v mezích 85 až 110 % U_n a frekvence v mezích 47,5 až 50,05 Hz. Gradient zvyšování činného výkonu po opětovném připojení nesmí přesáhnout hodnotu 10 % $P_n/\text{min.}$ s podmínkou respektování případných omezení na základě požadavku PDS (v závislosti na provozních podmínkách). Pokud není VM typu A1 až C schopen postupného najetí s daným gradientem, připojí se daná výrobní po době, které je stanovena PDS v rozmezí 0 až 20 min. (za podmínky, splněných mezí napětí a frekvence).

U VM typu D je automatické opětovné připojení zakázáno. Zpětné připojení je provedeno na pokyn dispečinku PDS. Synchronizační zařízení těchto VM musí mít možnosti nastavení odchylky napětí ΔU 30 % pro napětí v dovolených mezích, odchylky frekvence ± 250 mHz při rozsahu frekvence 47,5 až 51,5 Hz, rozdíl fázového úhlu $\pm 10^\circ$ na napěťové hladině a musí být dodržen stejný sled fází – to vše, pokud není sjednáno v podmínkách připojení jinak.

Kodex 4.8

Frekvenčně závislý režim.

Problematika má návaznost na **RfG, čl. 15.2 d)**.

Dle RfG (viz tab. 3-4 (strana 74)) je nutno tuto vlastnost ověřit:

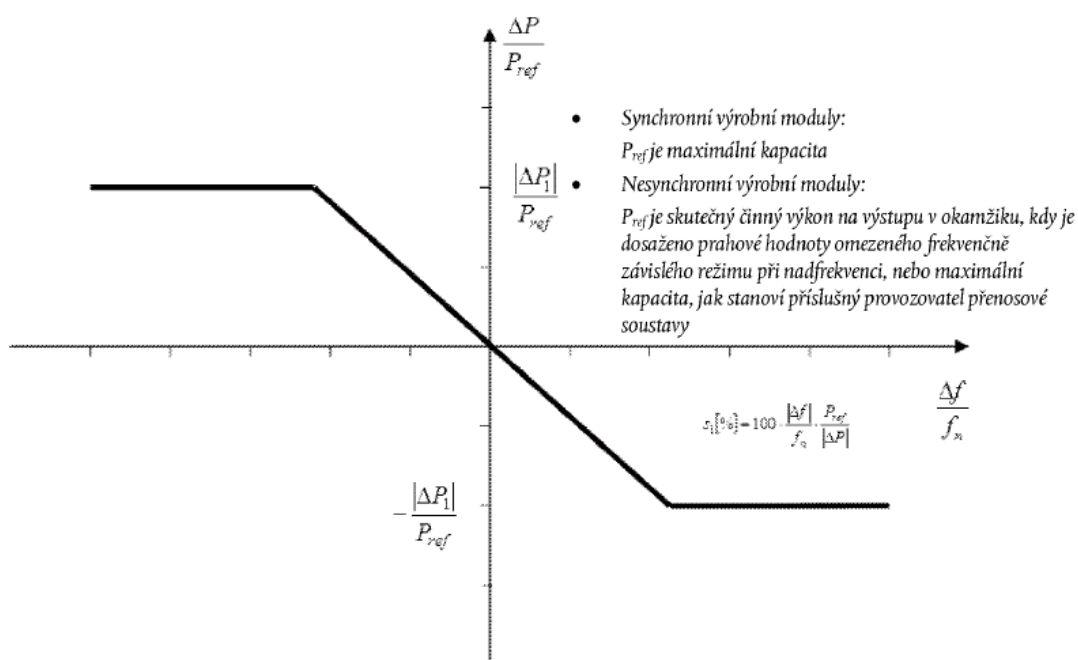
- zkouškou podle čl. 45.3 pro SVM typu C a D nebo
- simulací podle čl. 52.3 pro SVM typu C a D,
- zkouškou podle čl. 48.4 pro NVM typu C a D nebo
- simulací podle čl. 55.3 pro NVM typu C a D.

Jedná se v podstatě o primární regulaci frekvence. Tento článek Kodexu PS udává povinnost schopnosti VM poskytovat tzv. frekvenční odezvu činného výkonu závisle na frekvenci dle tab. 3-3.

tab. 3-3: Parametry pro frekvenční odezvu činného výkonu ve frekvenčně závislém režimu [1]

parametr	hodnota
statika s_1	2 – 12 %
necitlivost frekvenční odezvy	10 – 30 mHz
pásmo necitlivosti frekvenční odezvy	0 – 500 mHz
rozpětí činného výkonu vztahené k maximální kapacitě $\Delta P_1/P_{\max}$	1,5 – 10 %

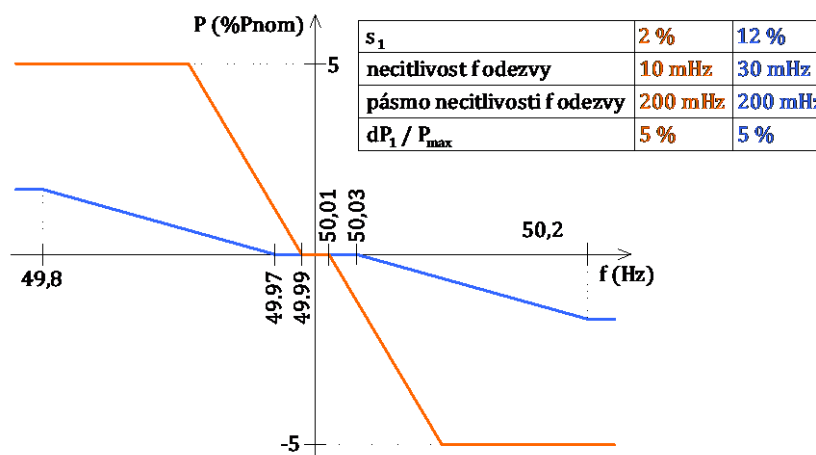
Průběh na obr. 3-18 uvádí grafický popis této funkce bez parametru pásma necitlivosti frekvenční odezvy a necitlivosti frekvenční odezvy.



obr. 3-18: Schopnost frekvenční odezvy činného výkonu u výrobních modulů ve frekvenčně závislém režimu ilustrující případ bez pásma necitlivosti a bez necitlivosti [1]

Pro lepší názornost byl vytvořen obr. 3-19, který ilustruje průběh dvou nastavení funkce frekvenční odezvy. Znázorněno je, že k ukončení regulační funkce je možno dojít různě – buď vyčerpáním nastaveného rozpětí činného výkonu (oranžový průběh) nebo překročením nastaveného pásma citlivosti frekvenční odezvy (modrý průběh).

Při definování nastavení této funkce je nutné mít na paměti, že na tuto regulaci navazují funkce frekvenční odezvy činného výkonu při nadfrekvenci a podfrekvenci.



obr. 3-19: Příklad průběhů funkce frekvenční odezvy činného výkonu

Plnou frekvenční odezvu musí být VM schopen poskytovat minimálně 15 minut v případě VM s parní turbínou, resp. 30 minut v případě využití ostatních druhů primárních zdrojů energie. Doba plné aktivace této schopnosti nemá u SVM přesáhnout 30 s vč. počáteční prodlevy, která nemá být delší než 2 s. U NVM je doba plné aktivace této schopnosti 1 s.

Kodex 4.19

Umělá setrvačnost.

Problematika má návaznost na **RfG, čl. 21.2.**

Dle RfG (viz tab. 3-4 (strana 74)) je nutno tuto vlastnost ověřit:

- simulací podle čl. 55.5 pro NVM typu C a D.

Kodex PS požaduje schopnost umělé setrvačnosti po nových NVM od instalovaného výkonu 1 MW. To v rámci ČR zahrnuje kategorie VM B2, C a D. Aktivování funkce umělé setrvačnosti má být na základě požadavků ČEPS, které nejsou dále specifikovány. S ohledem na dostatečně velkou setrvačnost ES ČR zatím není funkce umělé setrvačnosti po NVM vyžadována. Posouzení setrvačnosti soustavy má být prováděno ve 2leté periodě, dle Nařízení Komise EU 2017/1485, článku 39 [54].

3.1.2 Zkoušky a simulace souladu podle RfG

Hlava IV RfG uvádí informace ohledně souladu vlastností VM s požadavky uvedených především v hlavě II.

V kapitole 1 hlavy IV jsou definovány povinnosti vlastníka výroby elektrické energie (článek 40), úkoly příslušného provozovatele soustavy (článek 41), obecná ustanovení o zkouškách souladu (článek 42) a obecná ustanovení o simulacích souladu (článek 43). Povinnost ověřit vlastnosti VM je tak rozdělena na *zkoušky* a *simulace*. Cílem zkoušek i simulací chování VM v rámci výroby elektrické energie je prokázat splnění požadavků RfG.

Pro rozsah simulačních modelů stanovuje RfG čl. 15.6 c) povinnost vlastníka výroby elektrické energie poskytnout na žádost PPS nebo příslušného provozovatele soustavy simulační modely, které adekvátně odrážejí chování výrobního modulu při simulacích v ustáleném stavu i během přechodných jevů nebo při simulacích elektromagnetických přechodových dějů.

Vlastník výrobní elektrické energie musí také zajistit, aby *poskytované modely* byly ověřeny porovnáním s výsledky zkoušek souladu uvedených právě v hlavě IV (kapitolách 2, 3 a 4). Výsledky ověření musí vlastník oznámit PPS nebo příslušnému provozovateli soustavy. Pro členské státy navíc platí možnost provedení ověření certifikátorem¹². V závislosti na existenci jednotlivých komponentů musí modely poskytnuté vlastníkem výrobní dle RfG čl. 15.6 c) ii) obsahovat následující dílčí modely:

- alternátor a jeho pohon,
- regulace otáček a výkonu,
- regulace napětí, případně včetně funkce systémového stabilizátoru a systému regulace buzení,
- modely ochran výrobního modulu podle dohody mezi příslušným provozovatelem soustavy a vlastníkem výrobní elektrické energie,
- modely měničů u nesynchronních výrobních modulů.

Žádost příslušného provozovatele soustavy musí být koordinována s příslušným PPS. Žádost zahrnuje:

- formát, ve kterém mají být modely poskytnuty,
- poskytnutí dokumentace o strukturních a blokových diagramech modelu,
- odhad minimální a maximální velikosti zkratového výkonu v místě připojení, vyjádřený v MVA, jakožto ekvivalent soustavy.

Pokud je o to vlastník výrobní elektrické energie požádán, musí příslušnému provozovateli soustavy nebo příslušnému PPS poskytnout záznamy chování výrobního modulu. Ten pak může takovou žádost podat proto, aby mohl porovnat odezvu modelů s těmito záznamy.

Příslušný provozovatel soustavy je oprávněn zkontrolovat, zda je VM v souladu s požadavky RfG provedením svých vlastních simulací souladu založených na poskytnutých zprávách o simulacích, simulačních modelech a měřeních ze simulačních zkoušek. Na druhou stranu musí příslušný provozovatel soustavy poskytnout vlastníkovvi výrobní technické údaje a simulační model soustavy v rozsahu potřebném pro provedení požadovaných simulací v souladu s hlavou IV kapitolami 5, 6 nebo 7.

Jak bylo zmíněno výše v textu této kapitoly, RfG v článku 43 definuje *Obecná ustanovení o simulacích souladu*. Tento odstavec tato ustanovení uvádí [1]:

1. Cílem simulací chování jednotlivých výrobních modulů v rámci výrobní elektrické energie je prokázat splnění požadavků tohoto nařízení.
2. Bez ohledu na minimální požadavky na simulace souladu, jež stanoví toto nařízení, může příslušný provozovatel soustavy:
 - a) povolit vlastníkovvi výrobní elektrické energie provedení alternativní série simulací za předpokladu, že tyto simulace jsou efektivní a postačují k prokázání toho, že výrobní modul je v souladu s požadavky tohoto nařízení nebo s vnitrostátními právními předpisy, a
 - b) vyžadovat, aby vlastník výrobní elektrické energie provedl další nebo alternativní série simulací v případech, kdy informace dodané příslušnému

¹² certifikátor (authorised certifier) je subjekt, který vydává certifikáty zařízení a dokumenty VM a jehož akreditaci provádí vnitrostátní pobočka Evropské organizace pro spolupráci v oblasti akreditace, zřízená podle nařízení Evropského parlamentu a Rady č. 765/2008

provozovateli soustavy v souvislosti se simulacemi souladu podle ustanovení hlavy IV kapitol 5, 6 nebo 7 nejsou dostačující k prokázání souladu s požadavky tohoto nařízení.

3. K prokázání souladu s požadavky tohoto nařízení vlastník výrobní elektrické energie předloží zprávu s výsledky simulací ke každému jednotlivému výrobnímu modulu ve výrobně elektrické energie. Vlastník výrobní elektrické energie vypracuje pro daný výrobní modul ověřený simulační model a předloží jej. Rozsah simulačních modelů je stanoven v čl. 15.6 c).
4. Příslušný provozovatel soustavy je oprávněn zkontrolovat, zda je výrobní modul v souladu s požadavky tohoto nařízení, provedením svých vlastních simulací souladu založených na poskytnutých zprávách o simulacích, simulačních modelech a měřeních ze simulačních zkoušek.
5. Příslušný provozovatel soustavy poskytne vlastníkovvi výrobní elektrické energie technické údaje a simulační model soustavy v rozsahu potřebném pro provedení požadovaných simulací v souladu s hlavou IV kapitolami 5, 6 nebo 7.

V následující tab. 3-4 jsou uvedeny typy zkoušek, které musí vlastníci VM vykonat. Informace v tab. 3-4 uvádí, které parametry a funkce musí být vyhodnocovány a testovány, ne jejich konkrétní meze či hodnoty. Indexy „S“ a „N“ ve sloupcích odstavce a typu VM značí, pro který typ VM daný požadavek platí – S pro SVM, N pro NVM. V posledním sloupci je uveden článek a odstavec, dle kterého je požadován soulad. U některých typů zkoušek existuje pro vlastníka VM možnost pro prokázání souladu s příslušným požadavkem použít certifikáty zařízení vydané certifikátorem. Tato možnost není u příslušných zkoušek v této práci uvedena z důvodu irelevantnosti k tématu práce.

tab. 3-4: Přehled zkoušek souladu dle RfG

název požadavku (zkoušky/simulace)	anglický název	článek.odstavec	pro typ VM	soulad s čl.ods. pís.
odezva v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci	LFSM-O response	44.2 _S , 51.2 _S 47.2 _N , 54.2 _N	B _S C _S D _S B _N C _N D _N	13.2 13.2
odezva v omezeném frekvenčně závislém režimu při podfrekvenci	LFSM-U response	45.2 _S , 52.2 _S 48.3 _N , 55.2 _N	C _S D _S C _N D _N	15.2 c) 15.2 c)
odezva ve frekvenčně závislém režimu	FSM response	45.3 _S , 52.3 _S 48.4 _N , 55.3 _N	C _S D _S C _N D _N	15.2 d) 15.2 d)
regulace s cílem obnovení frekvence	frequency restoration control	45.4 _S , 48.5 _N	C _S D _S C _N D _N	15.2 e) 15.2 e)
schopnost startu ze tmy ¹³	black start capability	45.5 _S	C _S D _S	15.5 a)
vypnutí do provozu na vlastní spotřebu	tripping to houseload	45.6 _S	C _S D _S	15.5 c)
schopnost dodávat jalový výkon	reactive power capability	45.7 _S , 52.5 _S 48.6 _N , 55.6 _N	C _S D _S C _N D _N	18.2 b), c) 21.3 b), c)
regulace P + regulační rozsah	active power controllability	48.2 _N	C _N D _N	15.2 a)
regulace U	voltage control	48.7 _N	C _N D _N	21.3 d)
regulace Q	reactive power control	48.8 _N	C _N D _N	21.3 d)
regulace účinníku	power factor control	48.9 _N	C _N D _N	21.3 d)
překlenutí poruchy	FRT capability	51.3 _S 53.3 _S 54.4 _N 56.3 _N	B _S C _S D _S B _N C _N D _N	14.3 a) 16.3 a) 14.3 a) 16.3 a)
obnovení P po poruše	post fault active power recovery	51.4 _S 54.5 _N	B _S C _S D _S B _N C _N D _N	17.3 20.3
ostrovní provoz	island operation	52.4 _S 55.4 _N	C _S D _S C _N D _N	15.5 b) 15.5 b)
tlumení výkonových oscilací	power oscillations damping control	53.2 _S 55.7 _N	D _S C _N D _N	19.2 21.3 f)
dodávky rychlého poruchového proudu	fast fault current injection	54.3 _N	B _N C _N D _N	20.2 b)
schopnosti zajišťovat umělou setrvačnost	capability of providing synthetic inertia	55.5 _N	C _N D _N	21.2 a)

Pozn.: - dolní index **S** označuje zkoušku/simulaci pro **synchronní VM**,
- dolní index **N** označuje zkoušku/simulaci pro **nesynchronní VM**,
- **modrá** barva textu označuje **zkoušku**,
- **červená** barva textu označuje **simulaci**,
- **fialová** barva textu označuje možnost použití **zkoušky i simulace**.

Následující podkapitoly obsahují informace přímo uvedené v RfG [1]. Informace se vztahují k popisu **simulací** souladu pro SVM a NVM – jde o **červeně vyznačené články a odstavce** v tab. 3-4.

RfG přímo nestanovuje podobu simulace dané funkce. Konkrétní podoba simulací je řešena až v rámci kapitoly 11.1 této práce.

Simulace odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci (SVM B, C, D)

RfG čl. 51.2

¹³ Zkoušku schopnosti startu ze tmy je nutné provést pouze u VM, který má tuto schopnost.

- a) pomocí simulace musí být prokázána schopnost výrobního modulu měnit činný výkon při nadfrekvenci v souladu s čl. 13.2;
- b) simulace se provede pomocí skokových a lineárních změn frekvence při nadfrekvenci až do dosažení minimální regulační úrovně, a to se zohledněním nastavení statiky a pásma necitlivosti;
- c) simulace je považována za úspěšnou v případě, že:
 - i) simulační model výrobního modulu je ověřen porovnáním s měřeními ze zkoušky souladu odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci, která je popsána v čl. 44.2, a
 - ii) je prokázán soulad s požadavkem stanoveným v čl. 13.2.

Simulace schopnosti překlenout poruchu (SVM B, C)

RfG čl. 51.3

- a) pomocí simulace musí být prokázána schopnost výrobního modulu překlenout poruchy za podmínek stanovených v čl. 14.3 a);
- b) simulace je považována za úspěšnou, je-li prokázán soulad s požadavkem stanoveným v čl. 14.3 a).

Simulace obnovení činného výkonu po poruše (SVM B, C, D)

RfG čl. 51.4

- a) musí být prokázána schopnost výrobního modulu obnovit činný výkon po poruše za podmínek stanovených v čl. 17.3
- b) simulace je považována za úspěšnou, je-li prokázán soulad s požadavkem stanoveným v čl. 17.3.

Simulace odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při podfrekvenci (SVM C, D)

RfG čl. 52.2

- a) musí být prokázána schopnost výrobního modulu měnit činný výkon při podfrekvenci v souladu s čl. 15.2 c);
- b) simulace se provede pomocí skokových a lineárních změn frekvence při podfrekvenci až do dosažení maximální kapacity, a to se zohledněním nastavení statiky a pásma necitlivosti;
- c) simulace je považována za úspěšnou v případě, že:
 - i) simulační model výrobního modulu je ověřen porovnáním s měřeními ze zkoušky souladu odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při podfrekvenci, která je popsána v čl. 45.2, a
 - ii) je prokázán soulad s požadavkem čl. 15.2 c).

Simulace odezvy ve frekvenčně závislém režimu (SVM C, D)

RfG čl. 52.3

- a) musí být prokázána schopnost výrobního modulu měnit činný výkon v celém rozsahu frekvencí v souladu s čl. 15.2 d);
- b) simulace se provede pomocí simulace skokových a lineárních změn frekvence dostatečně velkých k tomu, aby vyvolaly frekvenční odezvu činného výkonu v celém rozsahu, a to se zohledněním nastavení statiky a pásma necitlivosti;

- c) simulace je považována za úspěšnou v případě, že:
 - i) simulační model výrobního modulu je ověřen porovnáním s měřeními ze zkoušky souladu odezvy ve frekvenčně závislém režimu, která je popsána v čl. 45.3, a
 - ii) je prokázán soulad s požadavkem čl. 15.2 d).

Simulace ostrovního provozu (SVM C, D)

RfG čl. 52.4

- a) musí být prokázáno chování výrobního modulu během ostrovního provozu za podmínek stanovených v čl. 15.5 b);
- b) simulace je považována za úspěšnou, pokud výrobní modul snižuje nebo zvyšuje činný výkon na výstupu ze svého předchozího pracovního bodu na kterýkoli nový pracovní bod v rámci provozního diagramu P-Q a v rámci limitů vymezených v čl. 15.5 b) bez odpojení výrobního modulu od ostrova v důsledku nadfrekvence nebo podfrekvence.

Simulace schopnosti dodávat jalový výkon (SVM C, D)

RfG čl. 52.5

- a) musí být prokázána schopnost výrobního modulu dodávat induktivní a kapacitní jalový výkon v souladu s podmínkami stanovenými v čl. 18.2 b) a c);
- b) simulace je považována za úspěšnou, jsou-li splněny tyto podmínky:
 - i) simulační model výrobního modulu je ověřen porovnáním s měřeními ze zkoušek souladu pro schopnost dodávat jalový výkon, které jsou popsány v čl. 45.7, a
 - ii) je prokázán soulad s požadavky čl. 18.2 b) a c).

Simulace regulace tlumení výkonových oscilací (SVM D)

RfG čl. 53.2

- a) musí být prokázáno, že výrobní modul v rámci svého chování, tj. jeho regulační systém („funkce systémového stabilizátoru“), je schopen tlumit oscilace činného výkonu v souladu s podmínkami stanovenými v čl. 19.2;
- b) pomocí ladění musí být dosaženo zlepšené tlumení odpovídající odezvy automatického regulátoru napětí v kombinaci s funkcí systémového stabilizátoru na činný výkon, a to v porovnání se samotnou odezvou automatického regulátoru napětí na činný výkon;
- c) simulace je považována za úspěšnou, jsou-li zároveň splněny všechny tyto podmínky:
 - i) funkce systémového stabilizátoru tlumí stávající oscilace činného výkonu výrobního modulu v rozsahu frekvencí stanoveném příslušným provozovatelem přenosové soustavy. Tento rozsah frekvencí musí zahrnovat lokální frekvence výrobního modulu a očekávané oscilace v soustavě; a
 - ii) náhlé snížení zatížení výrobního modulu z 1 p. j. na 0,6 p. j. maximální kapacity nevede k netlumeným oscilacím při činném nebo jalovém výkonu výrobního modulu.

Simulace schopnosti překlenout poruchu (SVM D)

RfG čl. 53.3

- a) musí být prokázána schopnost výrobního modulu překlenout poruchy za podmínek stanovených v čl. 16.3 a);
- b) simulace je považována za úspěšnou, je-li prokázán soulad s požadavkem stanoveným v čl. 16.3 a).

Simulace odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci (NVM B, C, D)

RfG čl. 54.2

- a) musí být prokázána schopnost nesynchronního výrobního modulu měnit činný výkon při nadfrekvenci v souladu s čl. 13.2;
- b) simulace se provede pomocí skokových a lineárních změn frekvence při nadfrekvenci až do dosažení minimální regulační úrovně, a to se zohledněním nastavení statiky a pásma necitlivosti;
- c) simulace je považována za úspěšnou v případě, že:
 - i) simulační model nesynchronního výrobního modulu je ověřen porovnáním s měřeními ze zkoušky souladu odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci, která je popsána v čl. 47.3, a
 - ii) je prokázán soulad s požadavkem stanoveným v čl. 13.2.

Simulace dodávky rychlého poruchového proudu (NVM B, C, D)

RfG čl. 54.3

- a) musí být prokázána schopnost nesynchronního výrobního modulu dodávat rychlý poruchový proud v souladu s podmínkami stanovenými v čl. 20.2 b);
- b) simulace je považována za úspěšnou, je-li prokázán soulad s požadavkem stanoveným v čl. 20.2 b).

Simulace schopnosti překlenout poruchu (NVM B, C)

RfG čl. 54.4

- a) pomocí simulace musí být prokázána schopnost nesynchronního výrobního modulu překlenout poruchy za podmínek stanovených v čl. 14.3 a);
- b) simulace je považována za úspěšnou, je-li prokázán soulad s požadavkem stanoveným v čl. 14.3 a).

Simulace obnovení činného výkonu po poruše (NVM B, C, D)

RfG čl. 54.5

- a) musí být prokázána schopnost nesynchronního výrobního modulu obnovit činný výkon po poruše za podmínek stanovených v čl. 20.3;
- b) simulace je považována za úspěšnou, je-li prokázán soulad s požadavkem stanoveným v čl. 20.3.

Simulace odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při podfrekvenci (NVM C, D)

RfG čl. 55.2

- a) musí být prokázána schopnost nesynchronního výrobního modulu měnit činný výkon při podfrekvenci v souladu s čl. 15.2 c);
- b) simulace se provede pomocí simulace skokových a lineárních změn frekvence při podfrekvenci až do dosažení maximální kapacity, a to se zohledněním nastavení statiky a pásma necitlivosti;
- c) simulace je považována za úspěšnou v případě, že:

- i) simulační model nesynchronního výrobního modulu je ověřen porovnáním s měřeními ze zkoušky souladu odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při podfrekvenci, která je popsána v čl. 48.3, a
- ii) je prokázán soulad s požadavkem stanoveným v čl. 15.2 c).

Simulace odezvy ve frekvenčně závislém režimu (NVM C, D)

RfG čl. 55.3

- a) musí být prokázána schopnost nesynchronního výrobního modulu modulovat činný výkon v celém rozsahu frekvencí v souladu s čl. 15.2 d)
- b) simulace se provede pomocí simulace skokových a lineárních změn frekvence dostatečně velkých k tomu, aby vyvolaly frekvenční odezvu činného výkonu v celém rozsahu, a to se zohledněním nastavení statiky a pásma necitlivosti;
- c) simulace je považována za úspěšnou v případě, že:
 - i) simulační model nesynchronního výrobního modulu je ověřen porovnáním s měřeními ze zkoušky souladu odezvy ve frekvenčně závislém režimu, která je popsána v čl. 48.4, a
 - ii) je prokázán soulad s požadavkem stanoveným v čl. 15.2 d).

Simulace ostrovního provozu (NVM C, D)

RfG čl. 55.4

- a) musí být prokázáno chování nesynchronního výrobního modulu během ostrovního provozu za podmínek stanovených v čl. 15.5 b)
- b) simulace je považována za úspěšnou v případě, že nesynchronní výrobní modul snižuje nebo zvyšuje činný výkon na výstupu ze svého předchozího pracovního bodu na kterýkoli nový pracovní bod v rámci provozního diagramu P-Q a v rámci limitů stanovených v čl. 15.5 b) bez odpojení nesynchronního výrobního modulu od ostrova v důsledku nadfrekvence nebo podfrekvence.

Simulace schopnosti zajišťovat umělou setrvačnost (NVM C, D)

RfG čl. 55.5

- a) model nesynchronního výrobního modulu musí prokázat schopnost zajišťovat umělou setrvačnost v případě snížení frekvence, jak je stanoveno v čl. 21.2 a);
- b) simulace je považována za úspěšnou, pokud se prokáže, že je model v souladu s podmínkami stanovenými v čl. 21.2.

Simulace schopnosti dodávat jalový výkon (NVM C, D)

RfG čl. 55.6

- a) nesynchronní výrobní modul musí prokázat, že je schopen dodávat induktivní a kapacitní jalový výkon, jak je stanoveno v čl. 21.3 b) a c);
- b) simulace je považována za úspěšnou, jsou-li zároveň splněny všechny tyto podmínky:
 - i) simulační model nesynchronního výrobního modulu je ověřen porovnáním s měřeními ze zkoušek souladu pro schopnost dodávat jalový výkon, které jsou stanoveny v čl. 48.6, a
 - ii) je prokázán soulad s požadavky čl. 21.3 b) a c).

Simulace regulace tlumení výkonových oscilací (NVM C, D)

RfG čl. 55.7

- a) model nesynchronního výrobního modulu musí prokázat, že je schopen tlumit oscilace činného výkonu v souladu s čl. 21.3 f);
- b) simulace je považována za úspěšnou v případě, že model prokáže soulad s podmínkami popsány v čl. 21.3 f).

Simulace schopnosti překlenutí poruchy (NVM D)

RfG čl. 56.3

Model nesynchronního výrobního modulu musí prokázat, že je vhodný pro simulaci schopnosti překlenutí poruchy v souladu s čl. 16.3 a).

(čl. 56.4) Simulace je považována za úspěšnou, pokud model prokáže soulad s podmínkami stanovenými v čl. 16.3 a).

3.1.3 Zkoumané jevy

Ač se práce výrazněji zaměřuje na problematiku možnosti ověřování vlastností VM uvedených v kapitole 3.1.1 na základě simulací uvedených v kapitole 3.1.2, je vhodné uvést obecný pohled na problematiku možností simulování různých jevů. Koneckonců i ověřování vlastností VM se v rámci jednotlivých požadavků na VM váže vždy k nějakému jevu. Každý z těchto jevů má svá specifika, která se projeví v požadavku na vlastnosti, robustnost a typ modelu. Uvědoměním si těchto návazností dochází k pochopení provázanosti požadavků na VM, simulací souladu dle RfG, typů modelů a v konečném důsledku i volbou a konstrukcí modelů zdrojů vytvořených v rámci této práce.

Dále popsané jevy je možné zkoumat z různých pohledů. Provozovatelé soustav a sítí řeší návaznosti, které jsou spojené především s provozem dané sítě, zatímco například provozovatele VM bude více zajímat chování jejich VM během různých jevů, které mohou nastat. Zaměření studií a výpočtu různých skupin se samozřejmě prolíná a nelze definovat použití konkrétních modelů pro konkrétní studie. Navíc, problematiku lze zkoumat na různé úrovni detailu (ustálené stavy, dynamické simulace, výpočty zkratů atd.). Navíc, problematika se může zaměřovat na určitý prvek sítě (VM, ochrany VM, ochrany v rozvodnách, zatížení transformátorů atd.).

Frekvenční odchylka je jev, který se dá v nejobecnějším náhledu popsat jako jev, který vzniká okamžitou nerovnováhou mezi výrobou a spotřebou elektrické energie. Frekvence, jako jeden z nejdůležitějších parametrů kvality elektrické energie je ve střídavé evropské ES udržována na hodnotě 50 Hz. Vlivem systémových vazeb v elektrické síti a systému nastavení ochran mohou vést fluktuace frekvence až k frekvenčnímu kolapsu, což v praxi znamená buď přechod konkrétní části sítě do ostrovního provozu, nebo blackout. V rámci problematiky frekvenčních odchylek lze typy prováděných studií rozdělit na studia regulace frekvence (frequency regulation), frekvenční stability (frequency stability) a dynamické stability (transient stability).

Velké změny napětí jsou jevem, který je nutné zkoumat z důvodu znalosti odezvy elektroenergetického systému na přechodné poruchy sítě. V rámci problematiky velkých změn napětí lze typy prováděných studií rozdělit na studia krátkodobé stability napětí (short-term voltage stability), dynamické stability (transient stability), příspěvků poruchového proudu (fault current contribution), krátkodobého poklesu napětí (low voltage ride through) a krátkodobého nadpětí (high voltage ride through).

Malé a dlouhodobé změny napětí jsou jevy spojené s menšími odchylkami napětí od nominálních hodnot s delší dobou trvání. Jedná se vesměs o studie zaměřené na schopnosti řízení sítě a VM s vazbou na lokální parametr napětí. V rámci problematiky malých a dlouhodobých změn napětí jsou nejčastěji řešeny studie dlouhodobé napěťové stability (long-term voltage stability).

Statická stabilita je jev, který je nutné zkoumat z důvodu znalosti/určení schopnosti soustavy udržet se v synchronním chodu při pomalých změnách výkonů.

Ostrovní provoz není sám o sobě jev. Nicméně, předmětem studií z této kategorie je zkoumání přechodů mezi synchronním a ostrovním provozem. A tak jako i u výše zmíněných studií, lze řešit návaznosti na funkce ochran (schopnost detekce, princip ochrany, nastavení atd.) a na funkce řízení (řízení VM, řízení sítě, řízení a komunikace komponent sítí atd.)

Literatura [55] rozděluje požadavky na funkce zdroje do kategorií řízení, ochran a schopností. V rámci těchto kategorií pak existují funkce VM a požadavek na jejich nezbytnost v rámci různých typů studií. Tato problematika – nutnost implementace různých funkcí VM, je provázaná zejména s praktickou částí této práce a je jí věnován prostor právě v kapitolách 9 a 10.

3.1.4 Požadavky na modely výrobních modulů

Požadavky na modely VM nejsou nikde legislativně stanoveny. Nicméně existují pracovní skupiny, které se touto problematikou zabývají a řeší ji na různých úrovních. V rámci problematiky modelování VM jsou řešeny dvě hlavní linie (oblasti), které spolu pevně souvisí. **První oblast** je typ modelu. Existuje několik základních přístupů k problematice počítačového, nebo lépe řečeno numerického modelování fyzikálních, v tomto případě elektromagnetických dějů. V podstatě jde o to, jak podrobný model, pro jaký typ simulace je vhodné či nutné použít s odkazem na správnost studie. Tuto oblast řeší kapitola 6.

Druhou oblastí jsou vlastnosti a možnosti modelu. Tuto oblast popisuje právě tato podkapitola. V návaznosti na podkapitulu 3.1.1 je možné rozdělit uvedené požadavky do celkem tří skupin, které mají v rámci funkce a schopností modelů zásadní vliv v chápání celé filozofie/koncepce provedení modelu. Požadavky na zdroje a tím i modely zdrojů lze rozčlenit do tří kategorií: řízení, ochrany a schopností (controls, protections, capabilities). Rozčleněním a rozdělením jednotlivých funkcionalit modelu zdroje lze snadněji popsat potřebu zakomponování dané funkcionality v modelu zdroje s ohledem na konkrétní studii či typ simulace, kterou lze provádět. Jinak řečeno, lze snadněji definovat nutnost zahrnutí dané funkcionality do modelu zdroje.

Souhrnným požadavkem na modely VM je, aby adekvátně odrážely chování VM při simulacích v ustáleném provozním stavu, během přechodných jevů, i při simulacích poruch. Z toho v podstatě vyplývá nutnost použití dynamických modelů VM.

Modely musí v závislosti na existenci jednotlivých komponent obsahovat následující dílčí modely [50]:

- alternátor a jeho pohon,
- regulace otáček a výkonu,
- regulace napětí, příp. vč. funkce systémového stabilizátoru a systému regulace buzení,
- modely ochran VM podle dohody mezi příslušným provozovatelem soustavy a vlastníkem výroby elektrické energie,
- modely měničů u nesynchronních VM.

3.1.5 Metodika ověření souladu s požadavky RfG - simulace

Pro účely této práce lze pro ilustraci konkrétních požadavků na provedení simulací souladu dle RfG použít dokument *Metodika ověření souladu s požadavky RfG pro výrobní moduly typu D* [50], který je výchozím dokumentem společnosti ČEPS, a.s. pro realizaci simulací souladu pro synchronní a nesynchronní VM.

Metodika definuje požadavky na simulace souladu všech deseti vlastností VM, které je možné ověřovat pomocí simulací. Různé simulace popsané v [50] platí pro různé typy VM. Vesměs jsou tam uvedeny kombinace synchronních a nesynchronních VM typů B, C a D. Nicméně, uvedená platnost je irelevantní pro účely této práce. Proto nebude uváděná platnost v následujících podkapitolách nikterak zmiňována.

Simulace odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci (LFSM-O)

Cílem simulace je prokázat schopnost VM měnit činný výkon v závislosti na změnách frekvence v síti při aktivaci omezovacího frekvenčně závislého režimu při nadfrekvenci (LFSM-O). Při překročení prahové hodnoty frekvence (Δf_i) musí být VM schopen měnit dodávaný činný výkon podle nastavené statiky a dle regulační rovnice 3.2.

$$\frac{\Delta P}{P_{ref}} = 100 \cdot \frac{|\Delta f| - |\Delta f_1|}{S_2 \cdot f_n} \quad (3.2)$$

(Rovnice je upravena a popsána v kapitole F13 – Odezva v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci, na straně 149.)

Požadavky na nastavitelnost parametrů jsou:

- prahová hodnota frekvence v pásmu 50,2 až 50 Hz, plynule nebo po krocích maximálně 0,01 Hz,
- statika S_2 v rozmezí 4 až 10 %, plynule nebo po krocích maximálně 1 %.

Výchozí hodnoty parametrů pro připojení k soustavě jsou:

- prahová hodnota frekvence 50,2 Hz,
- statika S_2 5 %.

Pro možnost porovnání výsledků simulace a měření ze zkoušky je nutné použít stejné velikosti prováděných změn frekvence. Model je pak ověřen porovnáním výsledků simulací a měření.

Popis samotných testů a kritéria jsou uvedeny v kapitole 11.1.1, kde je zároveň proveden jejich rozbor a simulace pro různé modely VM.

Simulace odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při podfrekvenci (LFSM-U)

Cílem simulace je prokázat schopnost VM měnit činný výkon v závislosti na změnách frekvence v síti při aktivaci omezovacího frekvenčně závislého režimu při podfrekvenci (LFSM-U). Při překročení prahové hodnoty frekvence (Δf_1) musí být VM schopen měnit dodávaný činný výkon podle nastavené statiky a dle regulační rovnice 3.2, s popisem v kapitole F12 – Odezva v omezeném frekvenčně závislém režimu při podfrekvenci, na straně 149.

Požadavky na nastavitelnost parametrů jsou:

- prahová hodnota frekvence v pásmu 49,5 až 49,8 Hz, plynule nebo po krocích maximálně 0,01 Hz,
- statika S_2 v rozmezí 4 až 10 %, plynule nebo po krocích maximálně 1 %.

Výchozí hodnoty parametrů pro připojení k soustavě jsou:

- prahová hodnota frekvence 49,8 Hz,
- statika S_2 5 %.

Pro možnost porovnání výsledků simulace a měření ze zkoušky je nutné použít stejné velikosti prováděných změn frekvence. Model je pak ověřen porovnáním výsledků simulací a měření.

Popis samotných testů a kritéria jsou uvedeny v kapitole 11.1.2, kde je zároveň proveden jejich rozbor a simulace pro různé modely VM.

Simulace odezvy ve frekvenčně závislém režimu (FSM)

Cílem simulace je prokázat schopnost VM měnit činný výkon v celém provozním rozsahu (mezi maximální kapacitou a minimální regulační úrovní VM) v závislosti na změnách frekvence v síti při aktivaci frekvenčně závislého režimu (FSM) podle rovnice 3.3.

$$\frac{\Delta P}{P_{ref}} = 100 \cdot \frac{|\Delta f|}{S_1 \cdot f_n} \quad (3.3)$$

(Rovnice je upravena a popsána v kapitole F11 – Frekvenčně závislý režim, na straně 148.)

Požadavky na nastavitelnost parametrů pro frekvenční odezvu činného výkonu jsou:

- statika S_1 v rozmezí 2 až 12 % (plynule nebo po krocích maximálně 1 %),
- necitlivost $\Delta f_i = 10$ mHz,
- pásmo necitlivosti frekvenční odezvy 0 až 200 mHz (plynule nebo po krocích maximálně 10 mHz),
- frekvenční odezva činného výkonu vztažená k maximální kapacitě $\Delta P_1/P_{max}$ v rozmezí 1,5 až 10 %.

Dále, doporučená minimální velikosti frekvenční odezvy a odpovídající hodnoty statiky pro zkoumaný režim pro různé maximální kapacity VM jsou uvedeny v tab. 3-5.

tab. 3-5: Doporučené minimální velikosti frekvenční odezvy a odpovídající hodnoty statiky pro FSM dle maximální kapacity VM

P_{max} (MW)	$\Delta P_1/P_{max}$ (%)	S_1 (%)
< 50	10	4
100	8	5
200	5	8
> 250	3,33	12

Pro možnost porovnání výsledků simulace a měření ze zkoušky je nutné použít stejné velikosti prováděných změn frekvence. Model je pak ověřen porovnáním výsledků simulací a měření.

Popis samotných testů a kritéria jsou uvedeny v kapitole 11.1.3, kde je zároveň proveden jejich rozbor a simulace pro různé modely VM.

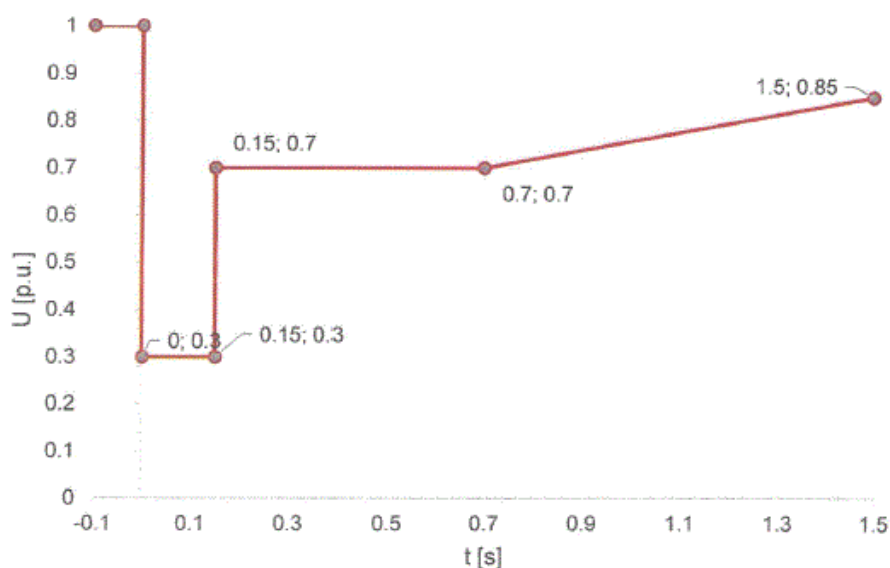
Simulace schopnosti překlenout poruchu (FRT)

Cílem simulace je prokázat schopnost VM překlenout poruchu v soustavě, kdy VM musí být schopen zůstat připojen k ES a pokračovat ve stabilním provozu po narušení v důsledku ochranami zajištěných poruch.

VM musí zůstat připojen k ES i v případě poklesu napětí k hodnotám, které jsou definovány FRT (Fault Ride Through) křivkou. FRT křivka je definována různě pro různé typy a kategorie VM a vyjadřuje dolní limit skutečného průběhu sdružených napětí před, během a po poruše. V následujících tabulkách, resp. obrázcích jsou uvedeny, resp. zobrazeny parametry FRT křivek pro různé typy VM. V případě nesymetrických poruch platí stejné FRT křivky v případě symetrických poruch.

tab. 3-6: Parametry FRT křivky pro SVM kategorie A1, A2 a B1 dle [50]

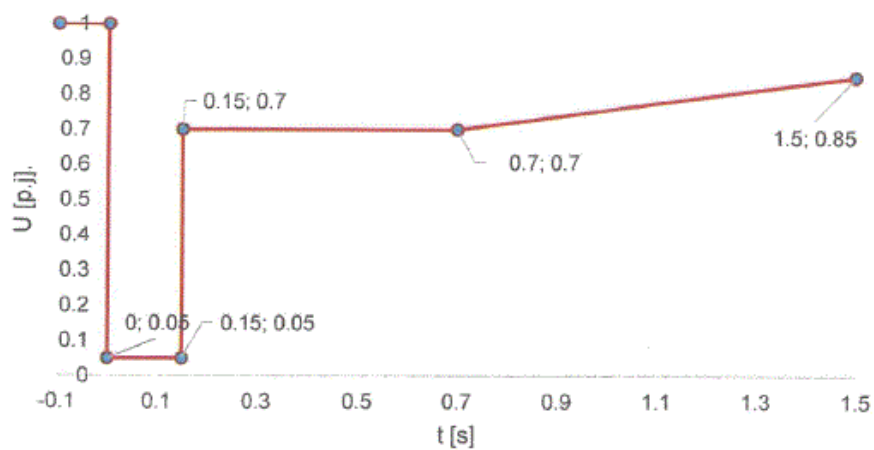
t (s)	U (p.j.)
0 – 0,15	0,30
0,15	0,70
0,15 – 0,70	0,70
1,50	0,85



obr. 3-20: FRT křivka pro SVM kategorie A1, A2 a B1 dle [50]

tab. 3-7: Parametry FRT křivky pro SVM kategorie B2 a C dle [50]

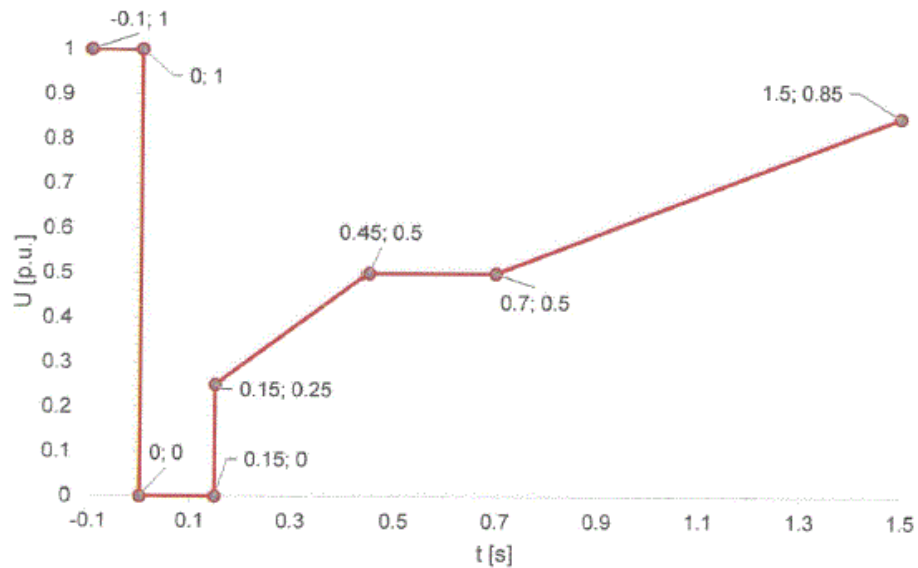
t (s)	U (p.j.)
0 – 0,15	0,05
0,15	0,70
0,15 – 0,70	0,70
1,50	0,85



obr. 3-21: FRT křivka pro SVM kategorie B2 a C dle [50]

tab. 3-8: Parametry FRT křivky pro SVM kategorie D dle [50]

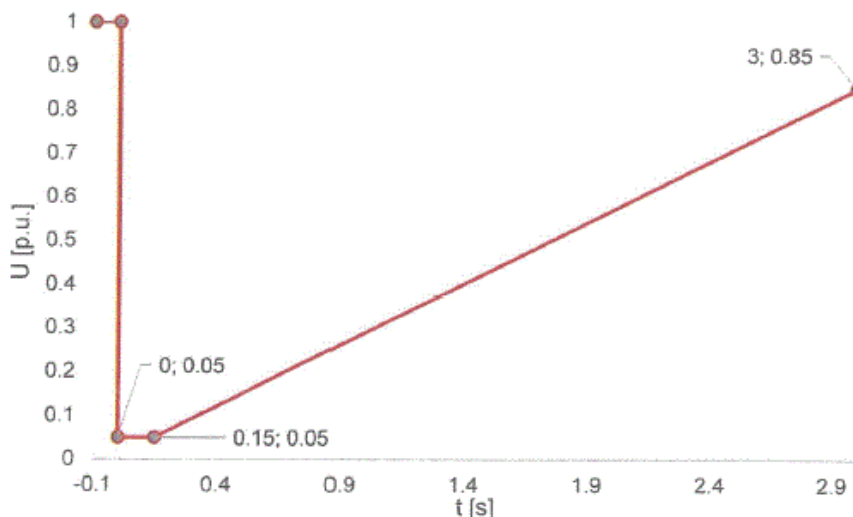
t (s)	U (p.j.)
0,15	0
0,15	0,25
0,45	0,50
0,70	0,50
1,50	0,85



obr. 3-22: FRT křivka pro SVM kategorie D dle [50]

tab. 3-9: Parametry FRT křivky pro NVM kategorie A, B a C dle [50]

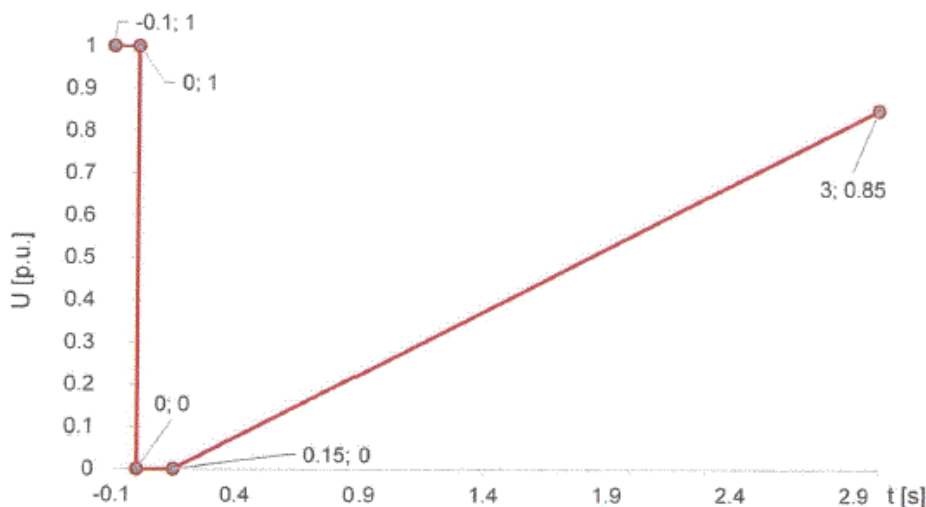
t (s)	U (p.j.)
0 – 0,15	0,05
3,00	0,85



obr. 3-23: FRT křivka pro SVM kategorie A, B a C dle [50]

tab. 3-10: Parametry FRT křivky pro SVM kategorie D dle [50]

t (s)	U (p.j.)
0 – 0,15	0
3,00	0,85



obr. 3-24: FRT křivka pro SVM kategorie D dle [50]

Popis samotných testů a kritéria jsou uvedeny v kapitole 11.1.4, kde je zároveň proveden jejich rozbor a simulace pro různé modely VM.

Simulace obnovení činného výkonu po poruše (Post Fault Active Power Recovery)

Cílem simulace je prokázat schopnost VM obnovit činný výkon po poruše v soustavě, která nevedla k odpojení výrobního modulu od ES. Konkrétní simulace ověření fakticky navazují na předchozí simulaci (simulace schopnosti překlenout poruchu) a prakticky jen rozšiřuje vyhodnocení daných simulací.

Popis samotných testů a kritéria jsou uvedeny v kapitole 11.1.5, kde je zároveň proveden jejich rozbor a simulace pro různé modely VM.

Simulace ostrovního provozu (Island Operation)

Cílem simulace je prokázat schopnost VM měnit v rámci OP činný výkon závisle na změnách frekvence v soustavě v celém provozním rozsahu VM (od minimální regulační úrovně, po maximální kapacitu VM) a tím přispívat k obnovení frekvence v síti. Simulace mají za cíl prokázat schopnost VM pracovat během OP ve frekvenčně závislých režimech, které jsou řešeny v rámci prvních třech kapitol metodiky – frekvenčně závislý režim při nadfrekvenci (LFSM-O), frekvenčně závislý režim při podfrekvenci (LFSM-U) a frekvenčně závislý režim (FSM).

Parametry VM:

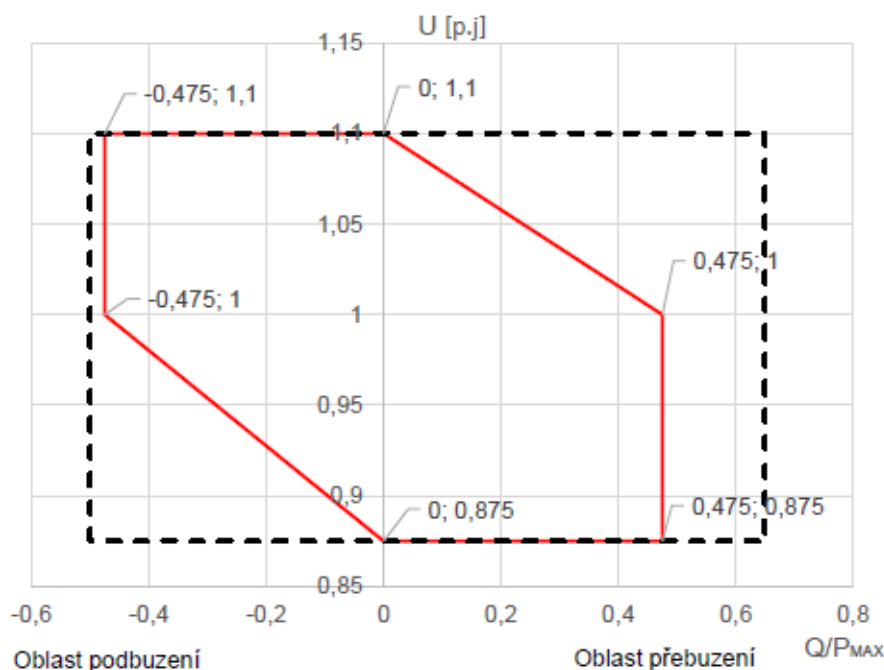
- Detekce přechodu do OP je ± 200 mHz bez záměrného zpoždění.
- Ostatní parametry jsou nastaveny podle podmínek frekvenčně závislých režimů (FSM, LFSM-O a LFSM-U)

Popis samotných testů a kritéria jsou uvedeny v kapitole 11.1.6, kde je zároveň proveden jejich rozbor a simulace pro různé modely VM.

Simulace schopnosti dodávat jalový výkon (Reactive Power Capability)

Cílem simulace je prokázat schopnost VM dodávat v místě připojení induktivní (oblast podbuzení) a kapacitní (oblast přebuzení) jalový výkon v žádaném rozsahu, při různém napětí, při různé dodávce činného výkonu VM.

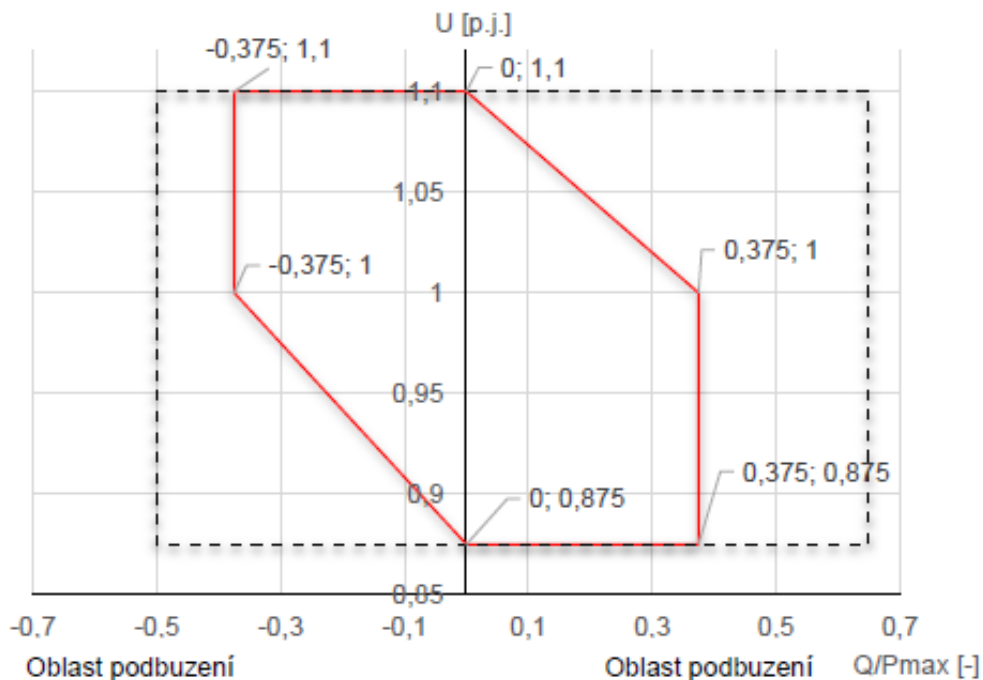
SVM musí být schopen pracovat při dodávaném maximálním činném výkonu VM v rámci diagramu na obr. 3-25. Maximální rozsah Q/P_{\max} je $0,95 (\pm 0,475)$ a maximální rozsah napětí v ustáleném stavu je $0,225$ p.j. ($0,875$ až $1,100$). Při provozu VM při nižším činném výkonu než P_{\max} musí být VM schopen provozu ve kterémkoliv možném pracovním bodě P-Q diagramu alternátoru SVM, a to přinejmenším do dosažení minimální úrovně stabilního provozu.



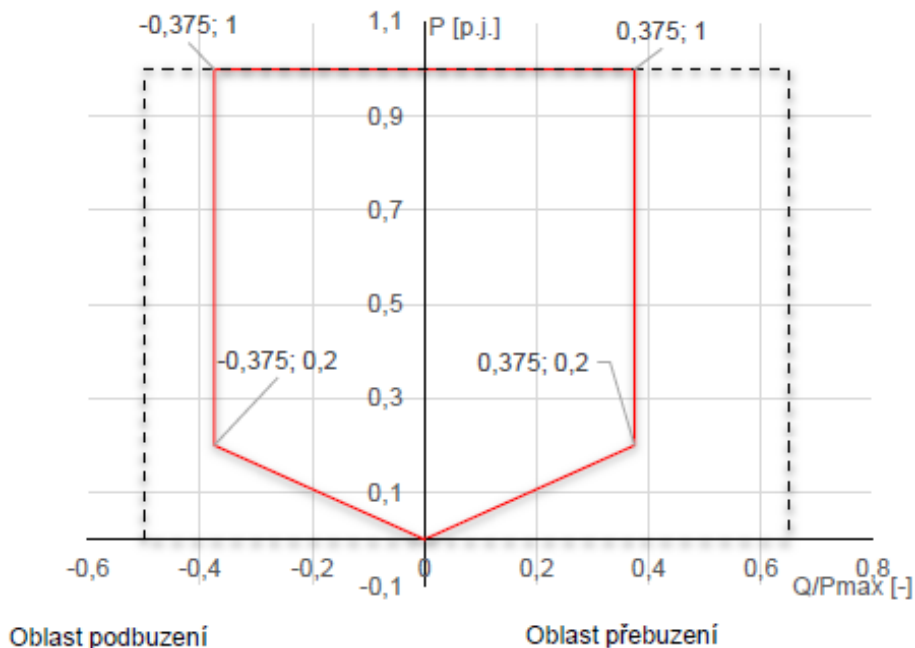
obr. 3-25: Diagram dodávky Q při maximální dodávce P pro SVM dle [50]

NVM musí být schopen pracovat při dodávaném maximálním činném výkonu VM v rámci diagramu na obr. 3-26. Maximální rozsah Q/P_{\max} je $0,75 (\pm 0,375)$ a maximální rozsah napětí v ustáleném stavu je $0,225$ p.j. ($0,875$ až $1,100$). Při provozu VM při nižším činném výkonu než

P_{\max} musí být VM schopen provozu ve kterémkoliv možném pracovním bodě P-Q diagramu znázorněném na obr. 3-27.



obr. 3-26: Diagram dodávky Q při maximální dodávce P pro NVM dle [50]



obr. 3-27: P-Q diagram dodávky Q při nižší než maximální dodávce P pro NVM dle [50]

Popis samotných testů a kritéria jsou uvedeny v kapitole 11.1.7, kde je zároveň proveden jejich rozbor a simulace pro různé modely VM.

Simulace regulace tlumení výkonových oscilací (PSS)

Cílem simulace je prokázat schopnost VM tlumit oscilace činného výkonu. Pro NVM se tato schopnost (tlumit výkonové oscilace, tlumit systémové kyvy) prokazuje podobně jako u SVM, a to ověřením měřením nebo simulačním výpočtem.

Ověření se provádí podle popisu v Kodexu PS – Část I [2], příloze 2 a ověřením odezvy na náhlé snížení výkonu z maximálního výkonu (P_{\max}) VM na 60 % P_{\max} , které nevede k netlumeným oscilacím činného a jalového výkonu.

V rámci simulací rozdělených do tří sad testů jsou postupně ověřovány schopnosti VM odezvy na skokovou změnu žádané hodnoty napětí VM, frekvenční charakteristiky odezvy na signál superponovaný k regulační odchylce regulátoru a vlivu změny zesílení systémového stabilizátoru na stabilitu VM.

Simulace dodávky rychlého poruchového proudu (Fast Fault Current)

Cílem simulace je prokázat schopnost VM dodat rychlý poruchový proud jalového charakteru v případě symetrických (třífázových) poruch soustavě (při podpětí, resp. přepětí).

Tato simulace se vztahuje pouze k NVM. NVM musí být schopen aktivovat dodávku rychlého poruchového proudu zajištěním rychlého poruchového proudu v místě připojení, nebo měřením odchylek napětí na svorkách jednotlivých bloků NVM a dodáním rychlého poruchového proudu na svorky těchto bloků. V rámci simulací je sledována odezva na skokovou změnu napětí.

Simulace schopnosti zajišťovat umělou setrvačnost (Synthetic Inertia)

Cílem simulace je prokázat schopnost VM zajistit umělou setrvačnost v případě velmi rychlých změn frekvence v soustavě.

Tato simulace se vztahuje pouze k NVM. Účelem simulací je ověřit schopnost NVM nahradit účinek setrvačnosti SVM na stanovenou úroveň výkonu. V rámci simulací je sledována odezva na změnu frekvence definované rychlosti. Cílem implementace schopnosti NVM zajistit umělou setrvačnost se váže k potřebě nahradit přirozenou vlastnost SVM, které v principu své funkce jdou proti skokové změně frekvence v síti. Tuto vlastnost NVM přirozeně nemají a musí být implementována na úrovni řízení zdroje.

3.2 Vlastnosti zdrojů

S ohledem na zaměření této práce lze zdroje obecně rozdělit do dvou skupin. Jedny generující elektrický výkon do sítě skrze točivý stroj, druhé, dodávající výkon do sítě skrze výkonové měniče. Obě tyto skupiny mají určitá specifika, která je nutno respektovat. Obě tyto skupiny byly zmíněny v předchozím textu jako SVM a NVM. Měničové zdroje (NVM) mají zpravidla odlišné odezvy na různé dynamické děje, než jak je tomu u synchronních generátorů (SVM). S ohledem na možnosti tvorbu modelů lze zatím (pro tuto úroveň kapitoly) uvést, že vlastnosti synchronních generátorů a jejich vazba na síť je relativně široce popsána v mnoha publikacích, zatímco problematika vazby střídač – síť byla do nedávné doby dost opomínána v kontextu velkých elektroenergetických systémů. I přesto lze nalézt několik hodnotných publikací (např. [56], [57] a [58]) zabývajících se modely synchronních generátorů (VtE) a měničových zdrojů (FVE) pracujících do úrovně přenosové soustavy – tzv. Large Scale Power System Studies.

I s ohledem na praktickou část této práce je vhodné zmínit rozmanitost zdrojů elektrické energie. Základní rozdělení uvedené v předchozím odstavci lze rozšířit o úvahu o rozmanitosti velikostí instalovaných výkonů a různorodost z pohledu místa připojení.

3.2.1 Rozdíly mezi IBG a SG

Je důležité rozlišit a popsat rozdíly těmito dvěma základními skupinami zdrojů, neboť jednak právě s rozvojem předpisů pro provoz nových zdrojů je často řešena otázka právě toho, o jaký zdroj

z těchto dvou skupin se jedná. Je nutné také poznamenat, že IGB, o kterých pojednává tato podkapitola, jsou základními měničovými zdroji, bez přidavných funkcionalit a dále SG, o kterých pojednává tato podkapitola, jsou velké synchronní generátory. Popis rozdílů mezi IGB a SG hraje důležitou roli při vytváření následných požadavků a návrhu řídicích funkcí především IGB.

SG přirozeně, na základě principu své funkce, mají s ohledem na provozování soustav řadu kladných vlastností, například směrem k statické a dynamické stabilitě. Jejich vlastnosti stály přirozeně i v evoluci principů řízení současného provozu sítě (které je popsáno v kapitole 2.3). Problematika začleňování většího podílu IGB sebou pak nese otázky vlivů a důsledků implementace IGB na provoz sítě z lokálního i globálního hlediska → z toho důvodu je třeba popsat rozdíly mezi těmito typy zdrojů.

Informace uvedené v následujících podkapitolách byly čerpány z [59] a [60] a byly doplněny v návaznosti na problematiku řešenou v rámci této práce. Pro problematiku integrace většího podílu IGB do energetického mixu jsou důležité zejména první čtyři oblasti – první čtyři následující podkapitoly (setrvačnost, poskytování/dodávka poruchového proudu, synchronizační moment a pevný vnitřní zdroj napětí). Důvodem je, že tyto vlastnosti a od nich se odvíjející charakteristiky různých parametrů jsou dobře popsány a známy u SG, ale nejsou poskytovány IGB na základě principu jejich funkce. Navíc, na těchto vlastnostech je více či méně závislé i schéma/princip provozu a řízení ES. I proto je nutné tyto rozdíly identifikovat a případné požadované vlastnosti implementovat/včlenit do IGB skrze jejich řízení. Navíc, některé z vlastností jsou i předmětem požadavků RfG, PPDS a kodexu PS, jak je popsáno v kapitole 3.1. Návaznost je také na konkrétní simulace souladu s požadavky RfG – viz tab. 3-4 (strana 74). Jedná se zejména o vlastnosti tlumení výkonových oscilací (power oscillations damping control), dodávku rychlého poruchového proudu (fast fault current injection) a schopnosti zajišťovat umělou setrvačnost (capability of providing synthetic inertia).

Všechny níže zmíněné rozdíly, a mnohé další, je nutné s ohledem na měnící se poměr SG a IGB zajišťujících výrobu elektrické energie zkoumat a řešit. Tyto rozdíly mohou hrát významnou roli při řešení provozu a řízení elektrizační soustavy. Navíc je třeba vnímat i vlastnosti zdroje energie dodávající energii samotnému SG nebo IGB – turbína a její typ, FV panel, akumulátor atd.

Setrvačnost

IBG nemají žádnou rotující hmotu, tudíž nemají přirozenou schopnost setrvačnosti v rámci vazby přeměny jakéhokoliiv využívaného druhu energie na energii elektrickou. Neznačená to, že setrvačnosti IGB nejde docílit. Setrvačnost IGB lze realizovat skrze řízení měniče a vhodnou volbou velikosti měniče (neboť důsledek setrvačnosti lze reprezentovat velikostí proudu přes výkonové prvky měniče, stejně tak velikostí napětí, a je s tímto nutné při návrhu IGB počítat). V takovém případě je řeč o umělé setrvačnosti. Umělá setrvačnost není úplný ekvivalent přirozené setrvačnosti SG. Zatímco setrvačnost SG je daná přímou vazbou přeměny energie setrvačné hmoty rotující na hnací hřídeli na energii elektrickou skrze synchronní generátor, umělá setrvačnost IGB je dána vazbou řízení měniče, které vnáší určité zpoždění ve vazbě měření (určení změny frekvence), změny reference výstupu na měniče v rámci řízení a samotnými spínacími procesy v rámci silové vazby, kdy v tomto řetězci (zejména při určení frekvence a její změny) vzniká určité zpoždění v reakci na změnu frekvence v síti, kdy je právě setrvačnost uplatněna. Toto zpoždění však nepřesahuje určitou pomyslnou limitu, kdy by aplikace umělé setrvačnosti ztrácela význam.

Uplatnění umělé setrvačnosti je realizováno s ohledem na změny frekvence napětí v síti. Z toho důvodu je často dávána do kontextu s detekcí či měřením rychlosti změny frekvence –

RoCoF (Rate of Change of Frequency). Rychlá kladná změna frekvence pak v rámci řízení IBG vede k požadavku na snížení výkonu, záporná naopak.

Problematika setrvačnosti je s ohledem na zvyšující se podíl IBG soustavě aktuální téma z pohledu celkové setrvačnosti elektroenergetického systému a její vazby na odchylky frekvence sítě. Tyto návaznosti, které jsou v konečném důsledku velmi důležité s ohledem na modely VM jsou popsány v samostatné kapitole 2.4.

Setrvačnost VM lze aplikovat IBG jako jeho funkcionalitu. Parametry setrvačnosti jsou pak závislé na typu zdroje primární energie, aktuálním pracovním bodě, případné možnosti akumulace a směru změny frekvence.

Dodávka / příspěvek / poskytování poruchového proudu

Principem své funkce střídače v případě poruchy v síti neposkytují induktivní poruchový proud, který by tekł do místa poruchy. Důsledkem tohoto faktu je neschopnost některých současných ochran vybavit s cílem odepnout poruchu.

Dodávku poruchového proudu lze do IBG implementovat skrze rozhraní řízení. Nicméně velikost příspěvku poruchového proudu je limitována v okolí nominálního proudu zdroje. A to za předpokladu, že veškerý činný výkon dodávaný do sítě je snížen na nulu a veškerý proud, který je schopen protékat výkonovými prvky bez jejich poškození, se přemění na jalový výkon.

Schopnost synchronizačního momentu

SG mají schopnost synchronizace momentu, což je velmi důležitá vlastnost z pohledu úhlové stability. Synchronizační moment je úměrný vnitřnímu napětí SG a rozdílu úhlů mezi synchronními generátory a ekvivalentním synchronním generátorem. Proto mohou SG měnit svůj činný výkon a zároveň tak zmírňovat změnu rozdílu úhlů.

Zdroj konstantního napětí

Napětí indukované ve vinutí SG je obvykle větší než napětí sítě. Kromě toho je toto vnitřní indukované napětí nezávisle regulováno samotným síťovým napětím. Když pak napětí v síti poklesne, způsobí to zvýšení výstupního proudu SG, což přirozeně přispívá ke stabilitě sítě. IBG přirozeně nemají takový vlastní vnitřní zdroj napětí. Proud, který lze dodávat do sítě během poklesu napětí je obvykle omezen nominálním proudem zdroje. Prvky řízení IBG lze pak aplikovat schopnost vytvářet napětí prostřednictvím režimu řízení master – U/f regulace (oproti slave – P-Q regulaci).

Odezva řízení

Řídicí odezva střídačů může být velmi rychlá. To je výhodou IBG a nabízí to příležitost navrhnout řízení střídače tak, aby bylo požadovaně flexibilní. Lze tak zohlednit potřeby řízení elektroenergetického systému, a to i při implementaci odlišného chování/odezvy střídače podle externích signálů a povelů (měření napětí, frekvence atd.).

Naopak nesprávná konstrukce řídicího systému IBG může mít za následek abnormální chování ovlivňující elektroenergetický systém, a to jak při normálním provozu, tak při ostrovním provozu, např. kvůli příliš rychlé odezvě řídicích smyček na malé odchylky napětí a frekvence.

Ztráta synchronismu

SG vypadnou ze synchronismu v případě ztráty úhlové stability. IBG naopak se udržují v synchronismu z podstaty svého algoritmu řízení. IBG musí totiž být synchronizovány se

střídavou síti pomocí fázového závěsu (PLL – Phase Locked Loop). Tím je dosaženo zachycení úhlu napětí a je tak udržen výstup činného a jalového výkonu v požadovaném poměru. Vlastnosti PLL algoritmů však, zejména při poruchách, mohou ovlivnit odezvu střídače. Je třeba poznamenat, že IBG mohou také vypadnout ze synchronismu – mohou být odpojeny kvůli významnému poklesu napětí, nicméně nemají problém se statickou stabilitou.

Tlumení výkonových oscilací

Výkonové a frekvenční oscilace lze tlumit, když se do systému dodává další energie ve fázi s odchylkou rychlosti rotoru, která se okamžitě zpomalí, anebo když se systému odebere energie, která je naopak v protifázi. Tlumičím momentu lze dosáhnout dvěma způsoby. SG mají zkratovaný tlumič nebo amortizační vinutí, které pomáhá tlumit mechanické oscilace rotoru, pokud se rychlost rotoru odchyluje od synchronní rychlosti. Pro další zvýšení tlumení oscilací lze použít doplňkové ovládací prvky, nazývané výkonové systémové stabilizátory (PSS – Power System Stabilizers).

V případě IBG, modulace činného výkonu tlumí oscilaci přímo. Proces lze ovlivnit řízením zdroje. Schéma řízení injektování činného výkonu je stejné jako u PSS, které se často používá u SG s velkou kapacitou.

Řízení frekvence

Turbíny přímo spojené k SG mohou poskytovat primární, sekundární a terciární řízení frekvence. Tato schopnost silně závisí na charakteristikách hnacího stroje, nikoli na generátoru. Aby se tyto schopnosti napodobily i rámci IBG, být zajištěna schopnost okamžitě zvýšit nebo snížit činný výkon. IBG mohou poměrně snadno snížit svůj činný výkon, ale není pro ně snadné činný výkon vždy zvýšit. Jednou z možností je záměrně snížit jejich činný výkon v ustáleném stavu, aby byla zajištěna přiměřená výkonová rezerva. To má samozřejmě zjevné ekonomické důsledky. Další možností je akumulace energie, která je v případě potřeby regulace frekvence uvolněna.

Překlenutí poklesu napětí

SG jsou povinny odolat bez selhání zkratu jakéhokoli druhu na svých svorkách podle normy IEC 60034-3. Nicméně hnací ústrojí mít tuto schopnost vždy nemusí. Zatímco většina turbín velkých vodních, uhelných a jaderných elektráren takové schopnosti má, některé hnací stroje středních/menších tepelných elektráren mají proti prudkému poklesu napětí ochranu.

V současné době IBG obvykle nemají schopnost překlenout třífázové poruchy, protože fázový úhel napětí není možné detekovat v případě, kdy je síťové napětí velmi nízké (např. méně než 30 %, z důvodu rozepnutí magnetického stykače, který je umístěn mezi střídačem a sítí v důsledku ztráty buzení jeho magnetické cívky. Je třeba poznamenat, že se jedná o problém stykače, nikoli střídače. Nové techniky, jako je výpočet frekvence s vyšším rozlišením a použití magnetického stykače se zpožděním při ztrátě energie nebo s použitím UPS, mohou IBG dosáhnout schopnosti překlenout pokles napětí, označovaný jako FRT – Fault Ride Through.

Podpora jalového výkonu

Za normálního provozu sítě je jmenovitý účinník SG obecně v rozmezí 0,80 až 0,95, přičemž vyšší hodnota je typická pro moderní jednotky. Jmenovitý účinník pro distribuované IBG nebýval poskytován, což znamenalo, že jmenovitý účinník je jedna. Nicméně současné požadavky na provozovatele IBG požadují, aby IBG obsahovaly řízení jalového výkonu. Kromě toho musí být tato regulace jalového výkonu nezávisle aktivována v různé funkci, jako je regulace napětí, regulace jalového výkonu nebo regulace účinníku.

V případě poruch v síti může SG dynamicky měnit výstup jalového výkonu od okamžiku, kdy dojde k poruše systému, a tím zajistit okamžité zvýšení dodávky jalového výkonu. Naproti tomu nelze zaručit, že IBG může zvýšit dodávku jalového výkonu od okamžiku, kdy dojde k poruše, aby se zmírnil pokles napětí, hlavně proto, že doba detekce velikosti napětí nemůže být fyzicky okamžitá. IBG umožňuje zvýšení výkonu jalového výkonu s určitým zpožděním během poruchy snížením výkonu činného výkonu v rámci jmenovitého proudu. Proto bez ohledu na to, jak rychle je IBG schopen řídit napětí a proud, nemůže IBG vykazovat stejné okamžité zvýšení dodávky jalového výkonu jako SG.

Harmonické

Střídače mohou produkovat nesinusové proudy, které lze popsat a kvantifikovat jako harmonické emise ve frekvenční oblasti. Před povolením připojení IBG je třeba posoudit a regulovat emise harmonických dle platných norem. Emise harmonických proudů IBG závisí na typu použité technologie, strategii řízení střídače, existenci vysokofrekvenčního nebo nízkofrekvenčního vazebního transformátoru a harmonických napětích převládajících v síti do které zdroj dodává výkon.

Harmonické proudy generované SG (dané např. vzduchovou mezerou mezi vinutími) jsou obvykle zanedbatelné.

Start ze tmy

Start ze tmy je schopnost energetického systému restartovat se po úplném nebo částečném výpadku systému. Většina konvenčních generátorů je navržena tak, že pro spuštění vyžaduje napájení z energetického systému. Při černém startu však není tato dodávka k dispozici. Proto je nutné, aby při „restartování“ systému měly některé elektrárny vlastní pomocné zdroje. Tyto elektrárny lze poté použít k zajištění připojení dalších elektráren. Tradičně jsou schopností startu ze tmy obdařeny velké synchronní generátory připojené k přenosové síti.

V nadcházejících letech se očekává, že trend snižování počtu velkých systémových elektráren bude vést k tomu, že bude k dispozici méně tradičních poskytovatelů startu ze tmy. Pro IBG je schopnost dosáhnout startu ze tmy omezenější za extrémních síťových podmínek kvůli faktorům, jako je menší setrvačnost a menší kapacita přetížení k zajištění spouštěcího proudu pro napájení a použití PLL.

3.3 Řízení zdrojů

Obecně je zřejmé, že zdroje dodávající výkon do sítě je nutné nějakým způsobem řídit. Zvolené schéma řízení závisí na více parametrech. Vzhledem k návaznosti této kapitoly na kapitoly využívající poznatků uvedených v této kapitole (zejména kapitoly 2.3, 3.1, 9 a 10), je na systém řízení zdrojů v této kapitole nahlíženo způsobem rozčleňujícím řetězec systému řízení zdrojů na tři celky. Obecně lze systém řízení chápat jako úlohu určitého, prozatím obecného, regulátoru – vyregulovat určitou, prozatím obecnou, regulační odchylku. Konkrétní systémy řízení lze od sebe odlišit a popsat ve třech úrovních.

- První úroveň je **žádaná hodnota** regulátoru a tím i regulovaná veličina. Zde je možno rozlišovat, jestli je požadavek regulovat na požadované napětí a jeho úhel (U/δ) nebo napětí a frekvenci (U/f) anebo na požadovaný činný a jalový výkon (P/Q), popřípadě výkon a účinník ($P/\cos\varphi$). Tato úroveň má důsledek v tom, jak se bude zdroj v síti chovat. Zda-li bude, v případě P/Q regulace dodávat (nebo se snažit dodávat) zadaný výkon do sítě nebo,

v případě U/f regulace, udržovat požadované parametry v žádaných mezích a hradit tak v určitém rozsahu bilanci výkonu v síti.

- Druhá vrstva je samotný **regulátor**. Zde se dá rozlišit volba typu regulátoru (P, I, D, nebo jejich kombinace) a nastavení jejich konstant, dále také provázanost vstupní veličiny s požadovaným výstupním parametrem, resp. akčním členem.
- Třetí vrstva je **akční člen**. Cíl působení regulátoru je spjat s možnostmi regulované soustavy měnit svou regulovanou veličinu prostřednictvím určitého děje. Akčním členem může být např. regulační ventil na vstupu páry do parní turbíny, požadavek spínacích impulsů měniče atd. Zde je možné rozlišit různé typy výroben.

V rámci všech vrstev je pak společně nutné mít možnost úprav parametrů signálů, výpočtů a nastavení různých konstant a proměnných vstupujících do algoritmu řízení. Do různých vrstev pak lze zahrnout funkce, které určitým způsobem ovlivňují základní strukturu a dávají tak vzniknout celkové charakteristice zdroje. Některé vlastnosti charakteristiky zdroje vycházejí už ze samotné konstrukce a fyzikální podstaty funkce zdroje elektrické energie, některé vlastnosti zdroje však lze ovlivňovat navazující strukturou – v kontextu s touto prací se dá říct algoritmy, které mohou výrazně ovlivnit celkovou charakteristiku zdroje, zejména jedná-li se o IGB. Flexibilita designu řízení IBG umožňuje implementovat do vrstvy řízení těchto zdrojů funkce, které tento zdroj posunou svou charakteristikou k chování SG nebo implementují různé další funkce, které zlepšují vlastnosti zdroje při dynamických dějích či různých, pomalých nebo rychlých, přechodných stavech.

Požadavky na možnosti řízení zdrojů vychází z několika legislativních dokumentů, z nichž jsou pro tuto práci nejkonkrétnější již dříve zmíněné nařízení Komise 2016/631 (RfG) [1], ČSN EN 50438 [51] a EN 50549-1, 2 [48][49].

Sdělení následujících podkapitol se do značné míry prolíná a nelze je proto chápat odděleně. Podkapitoly vychází ze základních požadavků funkce zdroje v síti a každá popisuje vesměs problematiku řízení výkonu, který zdroj dodává do sítě. Popis problematiky se vztahuje především na NVM, jejichž strategie řízení je nutné vzít v úvahu při sestavování modelů.

3.3.1 U/f a P-Q regulace

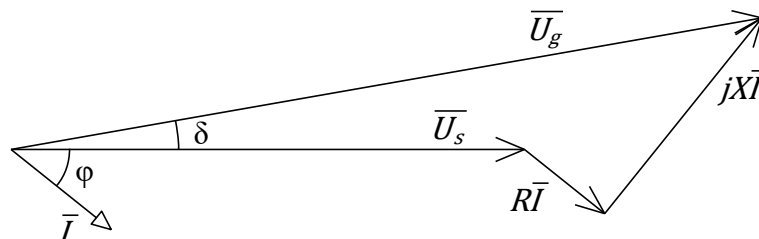
Se zaměřením nejen na mikrosítě a malé ostrovní systémy, lze definovat požadavky na řízení a regulaci těchto zdrojů. Podobně jako např. v [61] nebo [62], lze distribuované zdroje rozdělit (v kontextu s typem regulace) podle jejich úlohy v systému na PQ zdroje, které do sítě dodávají požadovaný nebo maximálně dostupný výkon a zdroje, které mají kromě možnosti P-Q regulace ještě schopnost přepnutí svého schématu řízení na U/f regulaci. U/f regulace je pak u těchto zdrojů využita v případě ostrovního provozu, kdy takto vybavený zdroj má schopnost převzít roli tzv. pilotního uzlu a vyrovnávat bilanci výkonu při udržení stanoveného napětí. P-Q regulaci lze označit jako regulaci používanou pro tzv. slave mód a U/f regulaci jako regulaci pro tzv. master mód. Do role bilančního zdroje (master – regulace U/f) může být v případě vyčlenění sítě uveden zdroj, který má dostatečný regulační rozsah. Z pohledu výpočtu napěťových poměrů a výkonových toků v tzv. ustáleném stavu lze bilanční uzly označit za zdroje s U/f regulací – zdroje, které hradí výkonovou nerovnováhu v síti při zachování daných napěťových a frekvenčních mezí.

Schémat provozu ostrovních sítí je v odborných člancích popsáno nespočet. Moderní síť nabízí stále se rozšiřující možnosti v oblasti managementu a řízení. Do role pomocného prvku master zdroje např. mohou být pomocí komunikace nebo nastavení schémat řízení zařazeny další zdroje se schopností na požadavek regulovat svůj výkon, může být použita akumulace energie,

může se vypomáhat s regulací výkonové bilance na straně odběru atd. Existují studie, kde je do role master prvku v ostrově uveden právě akumulátor – [63].

3.3.2 Řízení činného a jalového výkonu

Z pohledu řízení je pak, v návaznosti na předchozí podkapitolu, řeč o rozdělení strategií řízení na *PQ inverter control* a *VSI control* (Voltage source inverter). Rozdělení na tyto dvě skupiny vychází z matematického popisu chování systému: Pro zdroj pracující do sítě přes určitou impedanci lze sestavit fázorový diagram, jako je na obr. 3-28.



obr. 3-28: Obecný fázorový diagram zdroje pracujícího do sítě

Pro dodávaný proud (\vec{I}) pak platí:

$$\vec{I} = \frac{\vec{U}_s - \vec{U}_g}{R + jX} \quad (3.4)$$

kde \vec{U}_s je napětí zdroje (source); \vec{U}_g je napětí sítě (grid); R je odpor vedení; X je reaktance (induktivní) vedení. Pokud dále platí následující čtyři vztahy:

$$\vec{U}_s = U_s \angle \delta \quad (3.5)$$

$$\vec{U}_g = U_g \angle 0^\circ \quad (3.6)$$

$$P = \text{Re}\{\vec{U}_s \cdot \vec{I}^*\} \quad (3.7)$$

$$Q = \text{Im}\{\vec{U}_s \cdot \vec{I}^*\} \quad (3.8)$$

lze vyjádřit rovnice pro výpočet činného výkonu (P) a jalového výkonu (Q), které zdroj dodává do sítě dle následujících vztahů:

$$P = \frac{U_s}{R^2 + X^2} [R(U_s - U_g \cos \delta) + XU_g \sin \delta] \quad (3.9)$$

$$Q = \frac{U_s}{R^2 + X^2} [X(U_s - U_g \cos \delta) - RU_g \sin \delta] \quad (3.10)$$

Dodávka výkonu je tak ovlivněna impedancí sítě. V sítích vvn je poměr reaktance ku odporu velký ($X \ll R$), čehož se dá využít ke zjednodušení rovnic 3.9 a 3.10 zanedbáním odporu. Vztahy pro výpočet výkonu pak budou vypadat následovně:

$$P_{vvn} = \frac{U_s U_g \sin \delta}{X} \quad (3.11)$$

$$Q_{vvn} = \frac{U_s^2 - U_s U_g \cos \delta}{X} \quad (3.12)$$

Při uvažování malé velikosti úhlu δ (které v provozu sítě skutečně nastane) lze z rovnic 3.11 a 3.12 definovat, že v dané síti ($X \ll R$) je hodnota činného výkonu dána majoritně velikostí úhlu δ a jalový výkon napětím zdroje (U_s). V sítích nn je poměr $X:R$ vesměs opačný. Rovnice 3.9 a 3.10 tak lze upravit, při zanedbání reaktance do tvaru:

$$P_{nn} = \frac{U_s^2 - U_s U_g \cos \delta}{R} \quad (3.13)$$

$$Q_{nn} = -\frac{U_s U_g \sin \delta}{R} \quad (3.14)$$

A opět, při uvažování malé velikosti úhlu δ lze z rovnic 3.13 a 3.14 definovat, že v dané síti ($R \ll X$) je hodnota činného výkonu dána majoritně velikostí napětí zdroje (U_s) a jalový výkon velikostí úhlu δ – [64][65]. Uvedená odvození jsou důležitá s ohledem na zvolenou strategii řízení zdroje, kdy v reálném provozu nikdy nenastane situace závislosti činného a jalového výkonu dle rovnic 3.11 až 3.14, a proto je nutné uvažovat, že činný i jalový výkon je vždy ovlivněn jak úhlem napětí mezi zdrojem a sítí (δ), tak velikostí napětí zdroje ku napětí sítě. To, do jaké míry je který parametr ovlivněn pak závisí na poměru resistance a reaktance sítě, do které je zdroj připojen.

3.3.3 Regulace výkonu zdroje

Strategie řízení výkonu zdrojů lze rozdělit na řízení SG a IBG. Pro oba tyto typy zdrojů lze pak řešit jejich funkci v rámci P-Q regulace a v rámci U/f regulace, jak bylo popsáno v předchozích kapitolách.

Řízení SG

Základní popis problematiky řízení SG je popsán v [66]. Pro základní úvahu a realizaci výstupů řídicích smyček modelu SVM, který je aplikován v praktické části této práce, je hlavním bodem, že velikost činného výkonu a zároveň frekvence je funkcí velikosti mechanického momentu na hřídeli generátoru, a že velikost výkonu jalového je dána budícím napětím SG. Za použití této premisy lze snadno vytvořit takovou strukturu řízení, která bude realizovat řízení dodávky požadovaného P a Q – pomocí parametrů mechanického momentu a buzení.

V případě provozu SG jako zdroje zaštiťujícího roli pilotního uzlu či master zdroje v dané síti, je regulace frekvence (vyjadřující výkonovou bilanci sítě) funkcí mechanického momentu a velikost napětí funkcí buzení SG.

Pro schopnost přifázování zdroje na síť je opět při řízení využita závislost parametru frekvence napětí zdroje jako funkce mechanického momentu a závislost velikosti napětí jako funkce budícího proudu.

Řízení v rámci všech popsaných stavů lze realizovat požadavkem na mechanický moment na hřídeli generátoru a požadovanou úroveň buzení.

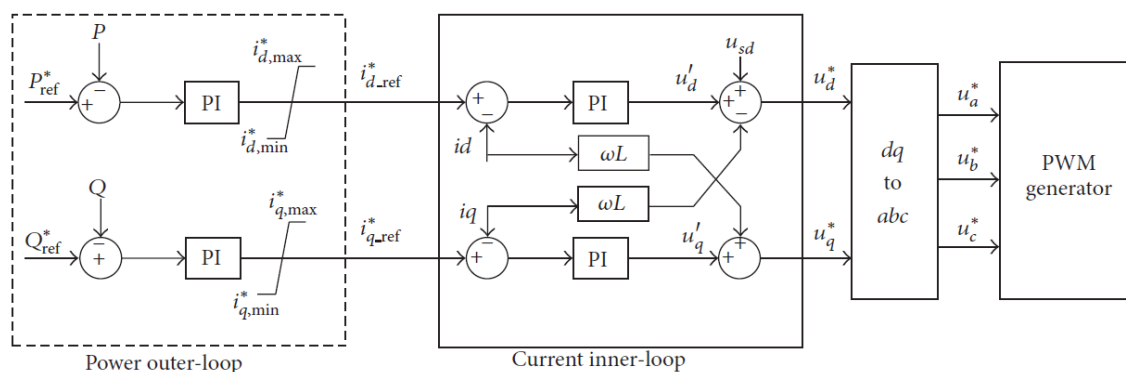
Řízení IBG

Vyčerpávající výklad topologií, řízení a teorie okolo střídačů užívaných v elektroenergetických systémech popisuje [67]. Avšak pro tuto práci konkrétnější jsou informace uvedené v [61], [63], [68] a [69], které popisují problematiku řízení IBG konkrétních IBG. Návaznosti řízení IBG v rámci ostrovních provozů pak popisuje např. [62].

Základní návazností v problematice řízení IBG je v podstatě geneze požadované napěťové vlny výstupního napětí zdroje. V rámci řízení je nutné řešit stavy provozu IBG a impedanci sítě v místě připojení zdroje. V podstatě se zde prolínají problematiky uvedené a popsané v předchozích dvou podkapitolách – 3.3.1 a 3.3.2. Pro realizaci řízení IBG v rámci praktické části této práce bylo adoptováno řešení použité v [63].

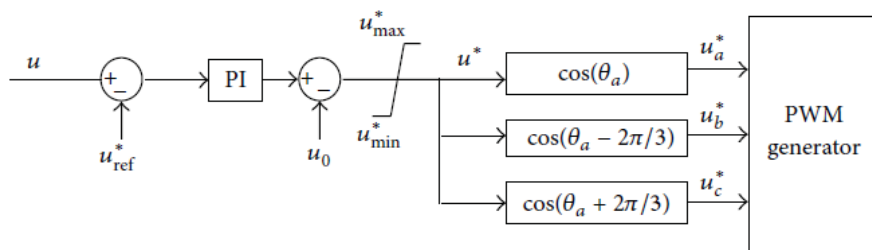
Pro P-Q regulaci, která je prakticky preferovaná u všech IBG pracujících do ES, lze použít algoritmus řízení, který je ilustrován na obr. 3-29. Okamžité hodnoty činného a jalového výkonu

jsou ve vnější výkonové smyčce porovnány s jejich referenčními hodnotami a je vytvořena referenční hodnota proudu reprezentována jeho požadovanými velikostmi d a q složek v dq souřadnicovém systému. Ve vnitřní proudové smyčce pak dle zobrazeného schématu vzniká reference komplexoru napětí, která je převedena na tři fáze požadovaných okamžitých hodnot fázových napětí a následně pak pomocí pulzně-šířkové modulace na spínací impulsy polovodičových spínačů střídače. Výhodou použití dq souřadnicového systému je vyjádření okamžitých hodnot napětí a proudů ve složkovém tvaru jejich hodnot. S takovou interpretací harmonického signálu dokážou správně pracovat samotné PI regulátory.



obr. 3-29: Schéma P-Q regulace [63]

U/f regulace IBG se uplatní v případě, kdy VM pracuje v tzv. master (napěťovém) módu, kdy přirozeně plní úlohu bilančního uzlu sítě. Tento režim může být požadován zpravidla při ostrovním provozu VM. Požadavek na frekvenci a velikost napětí je tak dán přímo potřebou udržení těchto parametrů při provozu sítě. Důsledek snahy o udržení požadovaných parametrů je pak dodávka úměrné hodnoty činného a jalového výkonu. Dosažení cíle regulace parametrů frekvence a velikosti napětí je pak závislá na disponibilním výkonu zdroje. Tento regulační režim se u IBG v podstatě uplatní také při fázování zdroje na síť. Použité schéma U/f regulace může mít podobu jako na obr. 3-30



obr. 3-30: Schéma U/f regulace [63]

Podstatou návrhu řídicích smyček IBG je integrace palety možností, které je pak schopen VM poskytovat. Základní členění je na regulační režimy popsané výše v této podkapitole, do nichž jsou zakomponovány další funkce jako například schopnost synchronizace VM a sítě a resynchronizace ostrova a zbytku sítě – aplikované v rámci U/f regulace, a PQ(Uf) závislosti – aplikované v rámci P-Q regulace.

3.3.4 PQU regulace

Regulacím činného výkonu, jalového výkonu a napětí v kontextu popisu požadavků na VM tak, jak je uvedeno v kapitole 3.1, se věnuje celá řada evropských provozovatelů distribučních i přenosových soustav. V odborné literatuře lze nalézt nepřehledné množství článků odkazující na

studie (např. [70], [71], [72], [73]), simulace (např. [74], [75]) či reporty z reálných provozů (např. [76]), které se problematikou PQU regulací zabývaly a zabývají.

Obečným cílem požadavků na PQU regulace je zlepšit schopnost začlenění VM do provozu sítě, a to na úrovni jednak lokální, především s ohledem na velikost napětí v místě připojení a jednak na globální, kdy je brán ohled na tok výkonů mezi různými částmi soustavy a frekvenci. V konečném hledisku pak existuje určitá skupina možností, jak lze regulovat různé parametry VM a mít tím vliv na konkrétní parametry VM a sítě. Požadavky, které jsou kladeny na schopnosti regulací VM umožňují jejich snadnější integraci do ES.

Požadavky na schopnosti PQU regulací jsou v podstatě popsány v příloze 4 PPDS [47], které jsou uvedeny a popsány v kapitole 3.1.1.

3.4 Ochrany

Tato práce se primárně zabývá provozem VM ve smyslu studia provozních schopností při různých stavech sítě. Vazba VM na jeho ochrany lze chápat z pohledu provozu technologie VM a z pohledu elektromagnetické vazby VM se sítí, do které je zdroj připojen. Při studiu prezentovaném v této práci nemá smysl zabývat se technologickými ochranami zdroje. Druhý typ ochran je nutné chápat a respektovat zejména s ohledem na platnou legislativu a využitelnost v rámci simulací. V kapitole 2.2.2 jsou definovány pro tuto práci relevantní ochrany, s nimiž se lze v rámci provozu ES setkat. Požadavky na systémy chránění jsou uvedeny v ČSN 33 3051 (Ochrany elektrických strojů a rozvodných zařízení) [77], PNE 38 4065 (ed.4) (Provoz, navrhování a zkoušení ochran a automatik) [78], a dále v ČSN EN 50549-1 (Požadavky na paralelně připojené výrobní s distribučními sítěmi - Část 1: Připojení k distribuční síti nn - Výrobní do typu B včetně) [48] a ČSN EN 50549-2 (Požadavky na paralelně připojené výrobní s distribučními sítěmi - Část 2: Připojení k distribuční síti středního napětí - Výrobní do typu B a včetně) [49].

ČSN 33 3051 [77] definuje požadavky na vybavení různých prvků ES různými typy ochran. Následující tab. 3-11 uvádí požadavky na chránění turboalternátorů dle ČSN 33 3051. Navíc je tab. 3-11 doplněna značením dle IEC-ANSI.

tab. 3-11: Chránění alternátorů dle ČSN 33 3051

IEC-ANSI	druh ochrany	Výkon zdroje – S (MVA)					
		< 1	1 až 5	5 až 10	10 až 50	50 až 200	> 200
50/51	nadproudová zkratová časově nezávislá	• ¹⁾	• ¹⁾	• ¹⁾	• ^{2) 3)}	• ³⁾	• ³⁾
21	zkratová podimpedanční				• ²⁾	•	•
49	přetížení statoru	(•)	•	•	•	•	•
87G	rozdílová		•	•	•	•	•
59	nadpětová ⁴⁾	(•)	•	•	•	•	•
59N	zemní statoru		•	•	•	• ⁵⁾	• ⁵⁾
64G	100 % zemní statoru					•	•
64R	zemní rotoru		•	•	•	•	•
59N	závitová ⁶⁾				(•)	(•)	•
32	zpětná wattová ⁷⁾		•	•	•	•	• ⁸⁾
46	nesouměrné zatížení				•	•	•
40	při ztrátě buzení ⁹⁾					•	•
40	při podbuzení					•	•
49R	přetížení rotoru					(•)	•
38	ložisková ¹⁰⁾						•
40	prokluz rotoru						• ²⁾
78	proti ztrátě stability						• ²⁾
81	podfrekvenční			(•) ¹¹⁾	(•) ¹¹⁾	(•)	•
81	nadfrekvenční						•
24	při přesycení ¹⁰⁾					(•)	(•)

• - ochrana se použije

(•) - ochrana se doporučuje

¹⁾ - ochrana může být s odblokováním při podpětí

²⁾ - podle provozních podmínek se použije jedna nebo druhá ochrana

³⁾ - ochrana je s odblokováním při podpětí

⁴⁾ - ochrana dvoustupňová nebo časově nezávislá

⁵⁾ - ochrana musí chránit 100 % délky vinutí

⁶⁾ - ochrana se použije, má-li vinutí statoru paralelní větve

⁷⁾ - ochrana se použije u protitlakých soustrojí, pracujících s protitlakem 0,8 MPa a vyšším, pokud součin výkonu (MW) a otáček (1/s) je 18 000 a vyšší; u kondenzačních a ostatních protitlakých soustrojí při jmenovitém výkonu 12 MW a vyšším, nebo je-li zpětná wattová ochrana předepsána výrobcem turbíny; ve všech případech musí být blokován vypínací impuls této ochrany ochranami turbíny

⁸⁾ - použijí se dvě ochrany

⁹⁾ - pokud výrobce alternátoru dovoluje, aby alternátor pracoval krátkodobě v asynchronním chodu, doplní se ochrana automatikou, která sníží zatížení alternátoru na hodnotu povolenou při asynchronním chodu

¹⁰⁾ - po dohodě s výrobcem stroje

¹¹⁾ - u dieselgenerátorů

Podobné požadavky jsou kladeny na hydroalternátory (tabulka neuvedena z důvodu malé relevance k následujícímu textu).

Pro doplnění možností chránění VM jsou v tab. 3-12 uvedeny ochranné funkce, které se dle [79] používají ochranu generátorů v sítích vn¹⁴.

¹⁴ Termínem „medium voltage“ jsou dle [78] v normách IEC, EN a v jiných dokumentech EU i v dokumentech některých států označovány úrovně napětí, které svým rozsahem odpovídá přibližně termínu vn užívaném v ČR. Mezní hodnoty medium voltage nejsou celosvětové ani celoevropsky jednotně stanovené.

tab. 3-12: Ochrany generátorů v sítích vn

IEC-ANSI	druh ochrany
87G	rozdílová (differential protection)
49	přetížení statoru (thermal protection against stator overload)
51	nadproudová (overcurrent protection)
40	ztráta buzení/podbuzení (protection against excitation faults (loss of field))
32	zpětná wattová (protection against reverse power (return of energy))
46	nesouměrné zatížení (overcurrent protection against negative sequence)
21	podimpedanční (under-impedance protection)
50V	napětově závislá nadproudová (overcurrent protection with voltage control)
27	podpětňová (undervoltage protection)
59	nadpětňová (overvoltage protection)
81	nadfrekvenční/podfrekvenční (over- and under-frequency protection)
24	při přesycení (overflux protection)
64R	zemní rotoru (protection against rotor ground fault)
64S	zemní statoru (protection against stator ground fault)

Oproti ČSN 33 3051 [77] (viz tab. 3-11) jsou požadavky na chránění generátoru dle [79] rozšířeny o ochrany 50V a 27. Obráceně jde o ochrany 59N, proti prokluzu rotoru (40 varianta), 38 a 78.

Pro účely této práce jsou relevantní návaznosti uvedené v příloze 4 PPDS [47]. Dříve preferovaná možnost odpojení především menších výroben při poruchách v síti není v současné době preferována z důvodu rostoucího počtu, resp. podílu menších VM. Z toho důvodu jsou vytvářeny či adoptovány požadavky na systémy chránění VM různých výkonů na různých napětíových hladinách a odpojení VM.

Příloha 4 PPDS rozděluje požadavky na nastavení ochranných limit do dvou skupin. V kapitole 8.1 (přílohy 4 PPDS) jsou uvedeny požadavky na tzv. mikro zdroje – VM s fázovými proudy do 16 A provozovaných paralelně s DS nn, na které se vztahuje ČSN EN 50 438 ed.2 (Požadavky na paralelní připojení mikrogenerátorů s veřejnými distribučními sítěmi nízkého napětí) [51]. Zmíněné požadavky jsou uvedeny v tab. 3-13.

tab. 3-13: Ochrany výroben s fázovými proudy do 16 A dle [51]

parametr	maximální vypínací čas (s)	nastavení pro vypnutí
nadpětí 1. stupeň	3,0	230 V + 10 %
nadpětí 2. stupeň	0,2	230 V + 15 %
nadpětí 3. stupeň	0,1	230 V + 20 %
podpětí	1,5	230 V - 15 %
nadfrekvence	0,5	52,0 Hz
podfrekvence	0,5	47,5 Hz

K tomu je vymezen prostor pro individuální nastavení ochrany na požadavek PDS. Vyhodnocení parametrů velikostí napětí musí být trojfázové, vyhodnocení parametrů frekvence může být jednofázové. Příloha 4 PPDS uvádí, že pro 1. stupeň nadpětí se použijí 10minutové hodnoty odpovídající ČSN EN 50160 (Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě) [80]. Výpočet 10minutové hodnoty musí odpovídat 10minutové agregaci podle ČSN EN 61000-4-30 (Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4-30: Zkušební a měřicí technika – Metody měření kvality energie) [81], třídy S. Tato funkce musí být založena na průměrné efektivní hodnotě napětí v intervalu 10 minut. Odchylka od ČSN EN 61000-4-30 spočívá

v klouzavém měřicím okně. Pro porovnání s vypínací mezí postačí výpočet nové 10minutové hodnoty nejméně každé 3 s. Na rozpoznání stavu odpojení výrobní od sítě PDS může být použita ochrana na skokovou změnu vektoru napětí (pro kterou zatím není k dispozici metodika pro určení nastavení) nebo relé na výkonový skok.

V kapitole 8.2 (přílohy 4 PPDS) jsou uvedeny požadavky na výrobní el. energie s fázovým proudem nad 16 A v sítích nn a výrobní připojené do sítí vn a 110 kV (VM A2, B1, B2, C, D). Základní rozmezí a doporučené nastavení ochrany rozpadového místa jsou uvedeny v tab. 3-14.

tab. 3-14: Ochrany rozpadového místa výroben s moduly (VM (A2), B1, B2, C) dle [51]

funkce	rozsah nastavení	doporučené nastavení ochrany	
nadpětí 3. stupeň >>	1,00 – 1,30 U_n	1,25 U_n	0,1 s
nadpětí 2. stupeň >>	1,00 – 1,30 U_n	1,20 U_n	nezpožděné
nadpětí 1. stupeň >	1,00 – 1,30 U_n	1,15 U_n	≤ 60 s
podpětí 1. stupeň <	0,10 – 1,00 U_n	0,70 U_n	0 – 2,7 s
podpětí 2. stupeň <<	0,10 – 1,00 U_n	0,30 U_n , 0,45 U_n	$\geq 0,15$ s
nadfrekvence $f >$	50,0 – 52,0 Hz	51,5 Hz	$\leq 0,1$ s
podfrekvence $f <$	47,5 – 50,0 Hz	47,5 Hz	$\leq 0,1$ s
jalový výkon & podpětí	0,70 – 1,00 U_n	0,85 U_n	$t_1 = 0,1$ s

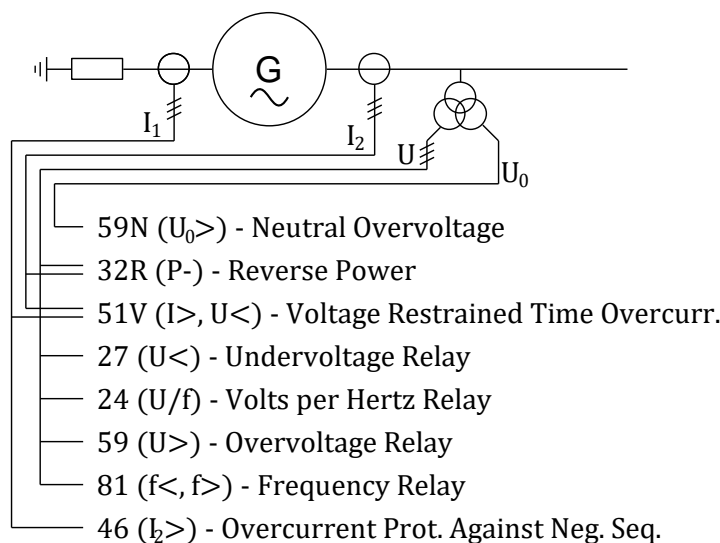
Podobně jako pro mikrozdroje, i zde platí pro 1. stupeň nadpětí použití 10minutových hodnot dle ČSN EN 50160. Nastavení zpoždění 1. stupně podpětí (0 až 2,7 s) je závislé na výkonu výrobní a kmitočtově závislém přizpůsobení výkonu. 2. stupeň podpětí vyvolá rychlé odpojení od sítě při blízkých zkratech. Nastavení ochrany 0,3 U_n pro tento stupeň ochrany se volí pro výrobní připojené do sítí 110 kV a napětí měřené na straně vn (odpovídá mu cca 15 % U_n v přípojném bodě). Nastavení 0,45 U_n se volí pro výrobní připojené do sítí vn a při měření napětí na straně nižšího napětí.

Dle RfG (čl. 16.2 c)) není odpojení VM typu D na základě odchylky napětí od referenční hodnoty vyžadováno. VM typu D totiž musí splňovat požadavek na schopnost překlenutí poruchy (FRT (Fault Ride Through) capability). Ta je definována křivkou uvedenou v příloze 4 PPDS [47] pro SVM a NVM – v této práci uvedenou v kapitole PPDS 9.2.2.1 (součást kapitoly 3.1.1).

Nastavení ochrany (funkce, mez a časové zpoždění) udává PPS nebo PDS v závislosti na koncepci chránění dané části sítě, způsobu provozu, přítomnosti OZ, přípojném bodě, výkonu VM atd. Nastavení se vztahují ke sdruženému napětí v sítích vn a 110 kV a časy vypnutí jsou součtem časového nastavení a časů vypnutí spínačů a ochrany.

Další návaznost, kterou je nutné respektovat a aplikovat je funkce RoCoF popsaná v kapitole ANSI 81R (součást kapitoly 2.2.2, strana 33). Na tento typ ochrany odkazuje RfG [1] v článku 13.1 b) jako na funkci, která je součástí schopnosti zdroje zůstat připojen k síti v různých provozních stavech sítě. Je pak úvahou a možností různé interpretace chápat funkci rychlosti změny frekvence jako funkci ochrannou nebo jako funkci, která má signalizovat ztrátu vazby s nadřazenou soustavou či přenosovou soustavou – tzv. Loss of Mains (LoM) nebo také Loss of Grid. Často je právě funkce RoCoF označována jako LoM ochrana (LoM protection). (Pojem a problematika LoM přímo souvisí s ostrovními provozem, popsanými v kapitole 4.)

Pro účely této práce lze také použít koncept chránění, který je uveden v [22], a který se bez aplikace redundance a ochranných funkcí, které nemají přímou vazbu na stav sítě (ochrana zemního spojení rotoru, ztráty buzení, generátorová rozdílová, teplotního přetížení generátoru) dá graficky prezentovat obr. 3-31.



obr. 3-31: Koncepce chránění bloku 10 MVA dle [22]

3.5 Testování zdrojů

K problematice testování a ověřování funkčních kapacit VM lze přistupovat různě. Konkrétní formy testování a ověřování vlastností a funkcí zdroje má vždy svoje specifika, svoji oblast využití a úroveň věrohodnosti z testu získaných informací.

Nejvíce vypovídající přístup je testování přímo v síti. Vše tak fyzicky odpovídá reálným podmínkám provozu. Lze sledovat vazbu/odezvu měřicího a řídicího systému VM, odezvu sítě a lze tak sledovat chování systému jako celku ve skutečných provozních podmínkách. Tento přístup zpravidla nenabízí možnost testování chování VM ve všech provozních podmínkách. To je zřejmě například z nemožnosti jednoduše korigovat velikost napětí a frekvenci sítě tak, aby byla ověřena schopnost VM reagovat na dané změny. Podobně, ověřování chování VM při poruchách v síti je také do značné míry ztíženo.

Ověřit více vlastností a funkcí zdroje připojeného přímo do sítě lze injektáží okamžité hodnoty průběhu napětí na jeho svorkách do měřicích obvodů zdroje. Návaznost řeší měřicí a řídicí obvody a lze tak sledovat chování VM v požadovaných situacích, které jsou dány právě simulovanou hodnotou napětí. Takto lze sledovat chování VM při jeho snaze řešit konkrétní stav sítě s ohledem na jeho funkce regulace činného a jalového výkonu v závislosti na napětí, popř. frekvenci. Navíc lze opět sledovat odezvu sítě v daném místě připojení.

Další možností je injektáž určitého parametru přímo do struktury řízení zdroje. Takto lze sledovat odezvu řízení – požadavky řídicího systému VM na jeho výkonovou část. Tato možnost přináší další možnosti testování chování zdroje v určitých provozních podmínkách, ale stále zde není možnost ověřit chování při skutečných stavech, se skutečnou vazbou VM a sítě.

To do určité míry přináší až možnost ověřování funkcí pomocí modelů. V případě, že existuje možnost s určitým stupněm přesnosti vytvořit softwarový ekvivalent VM a sítě, lze sledovat chování VM pomocí simulací, jejichž scénáře mohou odpovídat všem možným stavům sítě. Tato možnost je i předmětem této práce. Obecně se v budoucnu může jednat o spolehlivý nástroj pro možnosti ověřování vlastností a funkcí VM. Základním předpokladem však je existence jednak vhodného výpočetního nástroje a jednak existence dostatečně, ne-li úplně přesného modelového ekvivalentu reálného VM. Spolu s tím musí existovat i dostatečně robustní model sítě, který dokáže simulovat různé provozní stavy sítě.

4 OSTROVNÍ PROVOZ

Problematika OP již byla nastíněna výše v tomto dokumentu a tento pojem lze vnímat z různých úhlů pohledu. Pro vymezení problematiky již se tato práce zabývá, je nutné uvést pojem OP do vhodného kontextu. Pojem ostrov v podstatě znamená izolaci – izolovaný/oddělený systém, který nepracuje (na bázi předávání elektrického výkonu) s celkem – se zbytkem ES. O části soustavy, která nepracuje synchronně s celou, v podmínkách ČR tzv. synchronní sítě kontinentální Evropy, lze říct, že pracuje v ostrovním provozu. Tuto vymezenou část soustavy může tvořit různé uskupení zdrojů a spotřeby, od samostatné elektrárny, přes uzlovou oblast, po např. ES ČR. O stavu provozu sítě, či jakéhokoliv VM, lze říct, že pracuje buď v synchronním provozu, nebo v ostrovním provozu. Problematika OP má tedy návaznost jak na VM, tak i na samotný provoz sítě.

Vztáhne-li se problematika OP na DS, pak největším možným ostrovem může v ES ČR uzlová oblast 110 kV. V kontextu s OP se v posledních letech často mluví ochraně proti OP a metodách detekce OP. Důvodem je možný vznik nebezpečných podmínek provozu.

Zjednodušeně to lze vysvětlit na příkladu dvou různých topologií sítí: V prvním případě se jedná o síť, kdy zdroje na vyšších napěťových hladinách dodávají výkon do míst spotřeby, a zejména v místech oblastí konečné spotřeby lze vždy předpokládat jasný směr toku výkonu. Tato topologie je známá z minulých let a jednalo se o běžnou strukturu sítě, např. vývodu VN. Dojde-li v takové síti k přerušení radiálního vedení napájeného z jedné strany, pak je zřejmé, že odpojený úsek se ocitne bez napětí.

V druhém případě lze přidat do sítě z prvního případu zdroj výkonu na nižší napěťové hladině, nebo přímo rovnou do oblasti spotřeby na hladině NN. Stejný radiální úsek vedení je pak napájen nejen z příslušné rozvodny, ale i ze zmíněného zdroje. V případě přerušení dodávky z nadřazené rozvodny se odpojený úsek ocitne v OP, kdy dále záleží na schopnostech daného zdroje a chování spotřeby, jestli se bude jednat o bezpečný provoz, zejména s ohledem na hodnoty napětí a frekvence v takto vzniklé síti. To většina dosavadních zdrojů v současné době není schopna zvládnout. Samozřejmě, celá problematika je daleko složitější, neboť v systému se nacházejí různé nastavené ochrany, prvky s různým režimem provozu, existuje reálná možnost výkonové dysbalance, možnost provozu více zdrojů ve vymezeném ostrově atd. Dosavadním řešením vzniklé situace bylo odpojení zdroje od sítě, vypnutí zdroje, přechod zdroje do tzv. režimu vlastní spotřeby, případně přechod zdroje do regulace ve vymezeném ostrově.

Snahou mnoha pilotních projektů je dosáhnout toho, aby malé VM byly schopny pracovat v OP, aby je nebylo nutné odstavovat a aby byly schopny se se sítí zpátky synchronizovat. Cíle této snahy se různí, ale ať už jde o udržení napájení kritické infrastruktury [82], zlepšení kvality dodávky elektrické energie (SAIDI, SAIFI) nebo zlepšení ekonomiky provozu, dá se předpokládat, že v budoucích sítích budou jednoduše VM schopny OP.

Náplní této práce není dopodrobna tuto problematiku řešit, nicméně pro možnost studia schopnosti ostrovního provozu pro VM nebo např. sestavení řídicího schématu MAS budoucích sítí je nutná základní znalost této problematiky. S problematikou OP lze také spojit problematiku falešného vypínání zdrojů, resynchronizaci OP zpět k síti, koordinaci a funkci ochran atd. Problematika OP je spjata s tématem této práce v oblasti funkce MAS, schopností práce VM v režimu OP. Tímto je tato kapitola zaměřená pouze na úvod do problematiky OP a jejich detekce.

V oblasti ostrovních provozů a provozování mikrosít se pohybuje vymezení relativně velkého množství projektů různých provozovatelů, společností či firem. Jako autor si myslím, že touto problematikou je nutné se zabývat na úrovni implementace příslušných algoritmů řízení VM.

Vzhledem k vývoji na tomto poli, rozvoji bateriových, měničových a řídicích systému a zejména k velkému ekonomickému potenciálu je třeba se touto problematikou zabývat i v ČR, a to v dostatečném předstihu tak, aby byl zajištěn nepřetržitý a spolehlivý chod budoucí ES. Prostor ke zkoumání a testování nabízí právě i modely VM a agentů, které vznikly v rámci této práce.

4.1 Technické vymezení v rámci ES

Příloha 4 PPDS [47] rozlišuje několik definic stavů spojených s OP. První z nich je *ostrovní provoz části DS, která je odpojena od zbytku ES*. Tento stav DS vznikne buď řízeně nebo na základě funkce ochran v DS. Resynchronizaci ostrova k síti pak řídí příslušný dispečink. Do této definice lze zahrnout mimo jiné provoz kritické infrastruktury, mikrosít, start ze tmy, náhradní napájení po poruchách a při plánovaných pracích. Druhým definovaným pojmem je *ostrovní provoz odběrného místa v DS s výrobou*. Tento stav vznikne opět řízeně nebo na základě funkce ochran v DS. Resynchronizace pak probíhá podle kapitoly 9.5 přílohy 4 PPDS, případně skrze příslušný dispečink. Poslední definicí je *oddělený ostrovní provoz – Off Grid systém*. Jedná se o elektrickou instalaci s VM (mikrosít), která je provozovaná trvale odděleně od DS, bez možnosti připojení k DS. Zde musí být zajištěno, aby nedošlo k přenosu potenciálu a/nebo energie z/do DS, a to jak ze normálního provozu, tak i během poruchových stavů.

Fáze procesu vzniku OP a návratu k synchronnímu provozu lze z pohledu VM uvažovat následovně:

- 1) Normální provoz – synchronní provoz se zbytkem ES.
- 2) Vznik poruchy – okamžik vzniku stavu, kdy by mělo dojít k reakci sítě.
- 3) Vyhodnocení stavu OP – OP ano/ne.
- 4) Přejít do OP – možná změna režimu řízení.
- 5) Chod v OP.
- 6) Pokyn k ukončení OP – vyhodnocen autonomně nebo na povel externí entity (např. PDS).
- 7) Přejít do synchronního provozu – proces resynchronizace.
- 8) Znovupřipojení ostrova k síti.
- 9) Normální provoz – synchronní provoz se zbytkem ES.

Pro všechny tyto fáze musí existovat vazba v rámci definice požadovaného chování a nutných vlastností a funkcí VM, potažmo i agenta. Toto je řešeno v rámci praktické části této práce.

V [83] jsou významné fáze popsány jako normální chod (normal mode), kdy je snaha o minimalizaci provozních nákladů sítě a samoléčebný mód (self-healing mode), kdy je snaha o rychlou reakci pro obnovu normálního chodu po poruše/výpadku. Právě schopnost autonomní obnovy po poruchách je zde definována jako self-healing. Je zde také uvedeno, že distribuované metody, jako je MAS, jsou přijímány v těchto procesech lépe než centralizované přístupy, protože jejich decentralizované zpracování dat zajišťuje efektivní distribuci úkolů a rychlejší proces rozhodování. Je zde také zmíněná myšlenka aplikace genetického algoritmu v procesu obnovy. Ten sice může být pomalý, nicméně počáteční populace řešení je malá, takže lze i přesto dosáhnout řešení v rámci desetin sekund.

4.2 Detekce OP

Schopnost detekce OP je jedna ze základních predispozic pro spolehlivý přechod vyčleněné části sítě do OP. Problematika detekce OP je zpravidla svázaná se schopností zdroje (případně agenta) rychle a spolehlivě rozpoznat ztrátu galvanického spojení části sítě se zbytkem soustavy od poruchy v síti, která nevede k vytvoření ostrova. Stav, kdy dojde k přerušení galvanického spojení VM či části soustavy, do které VM pracuje a zbytku ES je označován jako Loss of Mains (LoM) – do češtiny často překládáno jako ztráta sítě. To je důvod, proč jsou metody detekce OP často označovány také jako detekce ztráty sítě (Loss of Mains Detection Methods).

Metody detekce OP lze rozdělit na aktivní, pasivní a komunikační.

Pasivní metody detekce OP

Vznik OP je často spojen se vznikem výkonové dysbalance mezi ostrovem a zbytkem sítě. Vznik výkonové nerovnováhy se projeví změnou parametrů vzniklého ostrova, které je možné měřit/vyhodnocovat. Nejužívanější pasivní metody jsou založeny na měření rychlosti změny frekvence – RoCoF (Rate of Change of Frequency) nebo posunu úhlu vektoru napětí – Vector Shift.

Problematika RoCoF je popsána v kapitole ANSI 81R (v rámci kapitoly 2.2.2, na straně 39). Princip druhé metody – Vector Shift, je založen na měření posunu úhlu vektoru napětí, kdy na základě principu jejího vyhodnocení následně vydává popud k detekci OP v případě překročení nastavené hodnoty úhlu.

Aktivní metody detekce OP

Aktivní metody jsou zpravidla založeny na principu injeckce určitého signálu do výstupního napětí zdroje a následném sledování odezvy. Injektáž byla více využívána i IBG, kde ji lze snadněji implementovat. Starší typy aktivních metod používaly periodické vkládání signálu a byly používány v sítích s nízkým počtem podobných VM. Čím větší je počet VM s podobnými injekcemi signálu, tím větší je interference signálu, což má za následek nesprávnou funkci nebo ztrátu citlivosti vyhodnocení OP.

S vývojem metod aktivních ochran začaly vznikat algoritmy, které záměrně aktivují injekci až teprve při malé změně napětí nebo frekvence.

Komunikační metody detekce OP

Poslední skupina metod detekce OP je založena na komunikaci. Komunikační metody analyzují různé parametry v uzlech sítě, které vyhodnocují a odvozují z nich případný vznik OP. Pro aplikaci těchto metod musí být implementována dostatečná komunikační architektura mezi prvky sítě. Zde se mohou například uplatnit informace z PMU (Phasor Measurement Unit) instalovaných v síti. Využita také může být komunikace přímo po silových vedeních – PLS (Power Line Signaling), obdoba principu komunikace HDO.

Více o základním popisu metod detekce OP je uvedeno např. v [84], ze které vychází většina popisu uvedená v této podkapitole. Pro návaznosti možností detekce OP je v praktické části této práce implementována možnost detekce OP pomocí RoCoF a pomocí dálkové komunikace.

5 MULTIAGENTNÍ SYSTÉMY

Problematika multiagentních systémů (Multi-Agent System – MAS) v souvislosti s elektroenergetickými systémy je relativně nový obor, který je řešen zejména s ohledem na možnosti tzv. chytrých sítí. Úvahy a aplikace pokročilých struktur komunikace a řízení elektroenergetických sítí přináší prostor pro zlepšování spolehlivosti provozu, zlepšování různých provozních ukazatelů (např. SAIDI, SAIFI) a neposlední řadě například možnost zlepšování provozních parametrů sítí.

Problematika MAS není původně oborově spjata s elektroenergetikou, a proto je na úvod vhodné uvést definici a popis MAS a samotných agentů a jejich modifikace a možnosti s ohledem na prostředí, ve kterém mají být využity – v elektroenergetickém systému. Existuje vícero obecných definic pojmu multiagentní systém. Například dle [85] je MAS soubor několika autonomních (inteligentních) agentů, z nichž každý jedná v souladu se svými cíli/úkoly/algoritmy, přičemž všichni agenti komunikují ve sdíleném prostředí, jsou schopni komunikovat a případně koordinovat své akce. Agent má vymezený pracovní prostor, a zpravidla nezná stav systému jako celku. V rámci elektroenergetického systému tak můžeme za prvek agenta označit VM (jako celek, vč. ochran) nebo ochranu kdekoliv v síti. Podmínkou je logicky určitá úroveň komunikace mezi těmito entitami. Agenti obecně řeší úkoly v rámci určitého prostředí. Pro elektroenergetický systém je prostředí definováno vazbou na konkrétní parametry systému jako je např. napětí, výkon, frekvence, impedance atd.

V [86] jsou identifikovány hlavní charakteristiky MAS:

- každý agent má jen neúplné informace a je omezen ve svých schopnostech,
- řízení systému je distribuované,
- data jsou decentralizovaná, a
- výpočet je asynchronní.

Literatura [87] pak dále rozděluje MAS podle dalších atributů:

- počet (dva a více agentů v MAS),
- jednotnost (homogenní až heterogenní),
- cíle agentů (v rozporu až komplementární),
- architektura agentů (reaktivní až deliberativní),
- schopnosti senzorů, efektorů a poznávání (jednoduché až pokročilé),
- frekvence (nízká až vysoká),
- perzistence (krátkodobá až dlouhodobá),
- úroveň rozhodovací náročnosti (na základě jednoduchého vstupního signálu až náročné na znalosti),
- tok dat a řízení (decentralizované až hierarchické),
- variabilita (pevné až měnitelné),
- účel (konkurenční až kooperativní),
- předvídatelnost (předvídatelné až nepředvídatelné),
- přístupnost k informacím a znalostem (neomezené až omezené),
- dynamika prostředí (pevná až proměnná),
- rozmanitost prostředí (chudá až bohatá),
- dostupnost zdrojů informací (omezený až dostatečný).

Podle knihy [88] existují v podstatě dva základní druhy MAS. V prvním systému spolupracuje několik agentů a sdílí své znalosti a činnosti a zdůvodňuje procesy koordinace. Ve druhém systému je práce na řešení konkrétního problému rozdělena mezi řadu agentů, které třídí a sdílí znalosti o problému a vývoji řešení.

Obecné definice je nutné konkretizovat pro potřeby této práce. Slovní spojení multiagentní systém se obecně dá v kontextu oboru elektroenergetiky definovat jako soubor inteligentních prvků, které dokážou navzájem komunikovat mezi sebou, i s nadřazenými prvky z pohledu řídicí hierarchie, dokážou sami měřit, vyhodnocovat a ovládat silovou funkci, která může být i přímo jeho součástí. Příkladem agenta může být recloser (úsekový vypínač) s dálkovou komunikací, některé moderní ochrany atd. Pod pojem agent lze zahrnout dispečerský ŘS a samotné VM. V této práci je podstatnou podmínkou pro označení prvku za agenta schopnost odesílat a přijímat zprávy dálkové komunikace. Navíc, pro účely této práce, je počítáno s tím, že agent disponuje i určitou výpočetní schopností, která je nutná k tomu, aby se „dokázal sám rozhodovat“.

Důležitou součástí MAS je schopnost úplné nebo částečné vzájemné komunikace mezi prvky v síti (agenti, zdroje, akumulace a případně odběry). Proto je pro ověření správné funkce MAS důležité vytvořit odpovídající modely prvků sítí, které budou dostatečně komplexní a robustní pro testování v rámci simulací. Pouze s adekvátně sestavenými modely lze simulovat, sledovat a vyhodnocovat finální funkci navrženého MAS, včetně situací, které mohou v síti nastat, jako přechod části vyčleněné sítě do OP, samotný OP a znovupřipojení ostrova zpět k síti. Lze sledovat a studovat různé nastavení a následné chování systému jako celku, i různých prvků samostatně.

5.1 Architektury MAS

Existuje nepřeberné množství publikací, které řeší otázku aplikace MAS v mnoha oborech lidské činnosti. V kontextu elektrických sítí lze uplatnit různé architektury MAS. Existují dvě mezní architektonické struktury, od nichž lze odvodit struktury další. Každé uspořádání fungování MAS má své výhody a nevýhody.

První mezní skupinu tvoří plně **centralizované MAS**, kde každý agent v síti je podřízen centrálnímu řídicímu centru, které rozhoduje o funkci každého agenta. Řídicí centrum v absolutní podobě je schopné přijímat informace o měření, poloze akčních členů a stavů podsystému agentů od každého agenta a zároveň je schopné každému agentu odeslat pokyn k jeho zásahu či změně jeho funkce nebo provozního stavu. Tento typ architektury je vhodný pro optimalizační procesy chodu sítě.

Druhou mezní skupinu tvoří plně **decentralizované (distribuované) MAS**, kde každý agent v síti plní svoji funkci jako autonomní jednotka a rozhoduje o svoji funkci sám, na základě vlastního měření a případně (v rámci této práce nutné) komunikace s dalšími agenty. Tento typ architektury je vhodný pro funkce FLISR (viz kapitolu 5.3.1 na straně 108).

Mezi těmito krajními skupinami lze realizovat další architektury. Jedna z nich je **hybridní MAS**, která si bere výhody z obou předchozích skupin. V normálním chodu může fungovat na základě pokynu centrálního řídicího systému (obecně pro optimalizaci chodu sítě) a v případě poruch, za podmínky dostupnosti potřebných dat, samostatně, na základě vlastního vyhodnocení situace.

Vzhledem ke struktuře elektrických sítí lze s výhodou aplikovat i tzv. **hierarchický MAS**, kde agenti fungují v různých rozhodovacích úrovních. Popis této struktury lze lépe chápat s pochopením kapitoly 5.4 (strana 109), která se zabývá rozdělením agentů do různých skupin.

Literatura [89] popisuje tuto architekturu následovně: Každý agent má v hierarchické struktuře možnost ovlivnit agenty pod sebou i nad sebou, tudíž zde agenti pracují na různých úrovních rozhodování. Úrovně agentů, od nejvyšší po nejnižší, mohou být řídicí centrum (chápáno jako druh agenta), recloser agent, zone agent a switch agent. Pak například zone agent má na starosti skupinu switch agentů atp. Agenti na nejnižší úrovni nemají příliš oprávnění a mohou jen komunikovat s agenty vyšší úrovně. Agenti na vyšší úrovni mají lepší přehled o stavu sítě a mohou při svém rozhodovacím procesu používat informace od svých agentů. Tok informací v této architektuře je zdola nahoru a příkazy pocházejí od agentů vyšších úrovní směrem dolů. Nevýhodou této architektury může být to, že porucha vyššího agenta může vytvořit kritické situace pro všechny své podřízené agenty.

Volba architektury MAS v podstatě přiřazuje každému agentu v systému určitou roli, úkoly a pravomoci. Při návrhu MAS však neexistuje povinnost volit mezi výše uvedenými strukturami. Zvolená architektura konkrétního MAS může být do vysoké míry unikátní, odvíjející se od prostředí, požadavků a možností. Dále pak schopnosti samotného agenta můžou nabývat různé úrovně složitosti – od vesměs dálkově řízeného úsečníku, až po inteligentní prvek schopný řešit úkoly na základě složitějších funkčních a učících se algoritmů.

5.2 Agent obecně

Agenty lze v nejširším slova smyslu popsat dle [90] jako autonomní výpočetní entity, které mohou být vnímány jako prvky vnímající jejich prostředí pomocí senzorů, a které dokážou působit na prostředí, ve kterém se nachází, prostřednictvím efektorů. Je-li řečeno, že agenti jsou výpočetní entity, jednoduše to znamená, že fyzicky mohou existovat ve formě programů, které běží na určitých výpočetních zařízeních. Je-li řečeno, že jsou autonomní, znamená to, že do jisté míry mají kontrolu nad svým chováním a mohou jednat bez zásahu lidí a jiných systémů. Agenti sledují cíle nebo plní úkoly tak, aby splnili své určené cíle s tím, že obecně tyto cíle a úkoly mohou být stejně tak doplňkové jako i konfliktní.

Pro účely této práce je nutné definici jednak konkrétněji specifikovat pro aplikaci v elektrických sítích a jednak doplnit o určitou část definice – viz následující kapitolu.

5.2.1 Agent v elektroenergetické síti

V kontextu s elektrickou sítí lze agenta chápat jako prvek, který je schopen plnit autonomně určitý úkol nebo úkoly. K plnění úkolů má k dispozici, nebo dokáže získat potřebná data, dokáže situaci vyhodnotit a provést úkon, který koresponduje s nastavením jeho funkce.

Obecně jde o prvek, který v první úrovni dokáže získávat informace o elektrických parametrech (např. napětí, proud, procházející výkon atd.) a stavech různých akčních prvků v síti (v oblasti agentů v elektrické síti jde především o stavové informace vypnuto nebo zapnuto různých sekčních spojek, vypínačů, úsečnicků, případně stavu výroben atd.). Tyto informace dokáže získat vlastním měřením nebo prostřednictvím komunikace s ostatními agenty nebo nadřazeným řídicím systémem (např. SCADA).

Druhou úrovní je schopnost zpracování a vyhodnocení získaných informací a rozhodování o povelení na akční členy. Tato úroveň je právě ta vrstva, která dává agentu určitou úroveň inteligence. V nejnižší úrovni inteligence můžeme hovořit např. o dálkově ovládaných úsečnicích – úsečník sám nic nevyhodnocuje, pouze plní pokyny nadřazeného systému skrze dálkovou komunikaci. Na opačné straně spektra inteligence si lze představit prvek který je plně kompetentní

vyhodnotit stav sítě a provést případně akční zásah. V této vrstvě jsou aplikovány funkce ochrany a diagnostiky sítě.

Třetí vrstvou je samotné provedení akčního zásahu. U síťových agentů se převážně jedná o rozeptnutí nebo sepnutí silového vypínače. Součástí tohoto zásahu je zpětná vazba o změně polohy vypínače a případná další komunikace s okolními agenty nebo nadřazeným systémem.

5.3 Možnosti MAS v ES

MAS lze využít k celé řadě funkcí. V odborné literatuře existuje mnoho pojetí a je popsáno mnoho způsobů využití pokročilejších řídicích, limitačních a bezpečnostních systémů. Tato podkapitola si klade za cíl rozlišit a definovat určité rozdělení možností a funkcionalit MAS.

Literatura [91] uvádí dva důležité atributy a zároveň požadavky na MAS. První vlastností je flexibilita, ve smyslu schopnosti správně reagovat na dynamické situace a schopnost přizpůsobit svou funkci měnícímu se prostředí. Druhou vlastností je rozšiřitelnost, ve smyslu schopnosti umožňovat upgrade současné funkce (např. když se změní topologie sítě a je třeba uvažovat komunikaci s novým agentem v síti, je nutné zavést novou funkcionalitu nebo je-li agentu přiřazen nový senzor apod.). Zejména s ohledem na druhou jmenovanou vlastnost je výhodou digitalizované provedení funkcionality agentů v MAS. Jiné požadavky jako životnost, spolehlivost a cena ponechme pro účely této práce stranou.

Závěry z [91], [92], [93], [94], [95], [96] a mnohé další literatury jsou shrnuty v následujících podkapitolách.

5.3.1 FLISR

FLISR (Fault Location, Isolation, and Service Restoration) je označení pro funkcionalitu chytrých sítí, která spočívá ve schopnosti systému včas a spolehlivě rozpoznat poruchy v síti, poruchy lokalizovat, postiženou část systému odpojit od zbytku soustavy a po odeznění přechodného děje (např. zkratu nebo poruchy obecně) připojit danou část systému zpět do zbytku soustavy. Pojem FLISR zahrnuje i další pojmy/zkratky, které se v problematice chytrých sítí vyskytují. V rámci této problematiky se tak můžeme setkat s pojmy jako např. D-FLISR (Distributed FLISR), FDISR (Fault Detection, Isolation, and Service Restoration), FDIR (Fault Detection, Isolation, and Recovery), FDI (Fault Detection and Isolation) apod.

Většina publikací zabývajících se touto problematikou se přímo odkazuje na nutnost aplikace vhodných agentů a spolupráci v rámci MAS. Tento přístup umožňuje zvyšovat spolehlivost chodu sítí a nalézá své uplatnění zejména v době decentralizace výroby elektrické energie, kdy právě svojí funkcí dokáže vyčlenit část sítě do ostrovního provozu namísto odpojení celého vývodu. V tomto případě je samozřejmě nutné na funkcionalitu FLISR navázat v rámci chytré sítě dalšími povely, které iniciují ostrovní provoz výroben.

Příklad možné implementace MAS do problematiky FLISR nabízí například [97] nebo [98], kde je pojem agent prakticky nahrazen pojmem Smart Terminal Unit (STU). Podobně se problematikou s ohledem na „samoléčení“ sítě – Self-healing zabývá [99].

5.3.2 Ekonomika a optimální provoz

Ekonomika provozu sítí má úzký vztah s využitelností zdrojů výroby elektrické energie a celkovou topologií sítě. Právě topologie sítě může rozhodovat o velikosti ztrát a tím ekonomice provozu sítě jako celku.

Samotní agenti jsou při otázce řešení optimálního provozu pouze malými entitami, které zpravidla vidí pouze do svého okolí. Optimalizace provozu v rámci MAS a chytrých sítí je tak většinou otázkou nadřazených systémů a dálkové komunikace. Agenti mohou nadřazenému řídicímu systému poskytovat data ze svých měření, a ten pak může vyhodnocovat možnosti rekonfigurace sítě právě s ohledem na ekonomiku provozu. Nadřazený řídicí systém zpravidla obsahuje i model přidělené sítě, který je schopen na základě reálně naměřených dat vypočítat ekonomiku provozu při různých topologických konfiguracích sítě. Na základě výpočtu je pak řídicí systém schopen skrze komunikaci s agenty měnit konfiguraci sítě. Onen nadřazený řídicí systém může být součástí určitého speciálního agenta, který může být s výhodou umístěn např. na vývodu uzlové oblasti.

5.3.3 Řízení mikrosítí

Další nadstavbou možnosti optimalizace provozu, nebo spíše jeho součástí, může být zahrnutí dalších prvků ES do MAS. Těmito prvky mohou být zdroje, akumulární prostředky a řízené spotřeby. V rámci mikrosítě nebo úmyslně či neúmyslně vytvořeného ostrova pak mohou tyto prvky pomáhat či ve větší míře řídit provoz dané sítě. Opět i zde se většinou používá nadřazeného řídicího systému, nicméně je možná i přímá komunikace mezi agenty, která může být navázána na základě různých stavů sítě – např. v případě pokynu ke znovupřipojení ostrova k síti mezi sebou mohou přímo komunikovat agent, který spíná připojovací místo ostrova a sítě a zdrojem, který plní roli pilotního uzlu v ostrovní síti.

5.4 Dělení agentů

V rámci konkrétních aplikací MAS se lze setkat s různým rozdělením agentů na jednotlivé typy či skupiny. V různých zdrojích informací se lze setkat s různým rozdělením agentů. I samotné funkcionality, jak se dají nazvat prvky fyzického vybavení agentů, jsou někdy označovány za agenty (tzv. Equipment Agents) [100]. Díky tomuto dalšímu dělení mohou být prvky agentů zařazeny mezi tzv. logické uzly definované IEC 61850-7-4 [101]. Nicméně, v rámci této práce je pro ilustraci možného dělení agentů, s cílem umožnit čtenáři náhled a představu o rolích a funkcích agentů, v následujících odstavcích uvedeno dělení, které vychází z příslušných publikací.

Literatura [100], zabývající se problematikou FLISR rozděluje agenty následovně: *Load Agent* (LA) – IED¹⁵ umístěný na přípojnicí, měřící proud tekoucí do nebo z příslušného vývodu. Tito agenti slouží jednak jako koncový prvek FLISR, ale i jako zdroj informací pro možnost rekonfigurace sítě z pohledu ekonomiky provozu (poskytují nadřazeným agentům informace o zatížení vývodu). LA tak pokrývá oblast celého vývodu, na jehož začátku (z pohledu nadřazenosti sítě) je nainstalován. *Substation-Side Agent* (SSA) – agent na straně rozvodny je agregací nadproudové ochrany rozvodny, příslušného měření a vypínače. V rámci své funkce řeší kapacitu zatížení jednotlivých přípojníc (ve spolupráci, resp. s použitím informací od LA). SSA pak spolupracuje i s dalšími, dále uvedenými agenty. *Sectionalizing Agent* (SA) – IED zahrnující funkci směrové nadproudové ochrany, příslušného měření a vypínače, který je schopen v rámci svých návazností spravovat rozdělení sekcí v rámci rozvodny. *DG Agent* (DGA) – IED zahrnující vypínač výroby elektrické energie, spolu s funkcí nadproudové ochrany. Tento agent také podává nadřazeným agentům informaci o výkonové kapacitě zdroje. *Tie Agent* (TA) – agent, jehož schopností je spínat úseky přípojníc v rozvodně. Na rozdíl od SSA je TA za normálního provozu

¹⁵ IED je akronymem pojmu inteligentní elektronické zařízení – Intelligent Electronic Device, které se v odborné literatuře používá např. pro označení agenta.

rozepnut a angažuje se právě v případě poruchy v síti. Agenti v rámci MAS se zaměřením na FLISR lze využít i pro jiné funkcionality systému. Agenty je také možno doplnit o další úkoly a funkce.

Literatura [83] a [93] se podobně zabývají problematikou FLISR. Autoři však pro popis řešení používají následující označení agentů: *Zone Agent* (ZA) – IED umístěné v určitém místě vývodu napájení, které je schopno měřit parametry jako napětí v místě svého připojení a proudy jím tekoucí. Jeho součástí je vypínač, který lze spínat a rozpínat na základě popudu vytvořeného ve vlastním algoritmu nebo na popud jiného ZA či nadřazeného agenta. Součástí je komunikace se sousedními ZA a nadřazeným agentem. *Feeder Agent* (FA) – IED umístěné v rozvodně, na začátku vývodu konkrétní oblasti, se schopností měření napětí a proudu a ovládající jemu přiřazený vypínač. V hierarchii má pod sebou zpravidla několik ZA, s nimiž dokáže komunikovat (získávat data jejich měření a stavu jejich vypínače a opačně, povelovat jejich vypínače). V případě poruchy v daném vývodu je FA schopen řešit situaci ve spolupráci s dostupnými možnostmi zajištění napájení (zdroje, spotřeby). *Substation Agent* (SA) – výpočetní a komunikační jednotka, které je schopna na základě vyhodnocení svých algoritmů komunikovat s ostatními SA s cílem řešení zajištění napájení dané oblasti. SA v rámci své rozvodny spravuje FA, od nichž získává potřebná data. Díky komunikaci SA mezi sebou má daný MAS informaci o stavu napájení v rámci své topologie a je schopno zajišťovat rekonfiguraci sítě v případě potřeby.

Literatura [102] užívá následující typy agentů: *Sectionalizing Switch Agent* (SSA) – obdoba SA uvedeného výše. *Tie Switch Agent* (TSA) – obdoba TA uvedeného výše. *Substation Agent* (SA). *Point of Common Coupling Agent* (PA) – IED umístěné v předávacím místě výroby nebo v místě, kde odpojuje konkrétní zátěž. PA je schopno měřit napětí a proudy, resp. výkony tekoucí z nebo do příslušného zařízení. *Disconnecter Agent* (DA) – se speciální typ výše popsaného ZA, který ale nemá schopnost vypínat poruchy.

Literatura [103] označuje agenty se schopností rozpojovat silový obvod jako CB agenty (*Circuit Breaker Agents* – CBA), které pak dále rozděluje dle příslušnosti k danému místu v síti a funkci, kterou má vykonávat v rámci MAS na: *Line Agent* (LA), *Generator Agent* (GA) a *Load Agent* (LA).

Literatura [104] označuje za agenty i jiné entity než samotné prvky sítě. Vyskytují se tak zde pojmy jako *Generation Agent* (GA), *Load Agent*, *Auction Agent* (AA), *Grid Agent* (GA), *Storage Agent* (SA). [104] je konkrétně zaměřen na agentově-orientované programování (Agent-oriented Programming – AOP).

Podobných publikací lze nalézt celou řadu. Každé možné dělení je možno vnímat z různých pohledů. Konkrétní rozdělení tak, jak je uvedeno v předchozích čtyřech odstavcích jejich autoři použili s ohledem na konkrétní účel MAS, s vazbou na jejich vazby a prostředí. Cílem uvedení předchozích rozdělení agentů je možnost provést shrnutí za účelem definice obecné podoby agenta, jímž se zabývá praktická část této práce.

Pro účely této práce není dělení agentů kritickým tématem, neboť v rámci simulačního prostředí lze sestavit takový model agenta, jehož konfigurací a nastavením rozhodne sám uživatel o jeho funkcích a návaznostech – což je jedním z cílů této práce.

5.5 Komunikace

Komunikace je nedílnou součástí moderních elektroenergetických systémů a její důležitost nabývá se složitostí komunikačních a řídicích rozhraní. Mnoho výrobců síťových

elektroenergetických zařízení, dnes označovaných spíše jako IED, vytvářelo vlastní protokoly komunikace pro svá zařízení. To přinášelo problémy s kompatibilitou při realizaci složitějších systémů, kde spolu musely komunikovat zařízení různých výrobců. Bylo tak nutné aplikovat různé převodníky, což přinášelo zvýšenou složitost systému a v konečném důsledku i menší spolehlivost. V dnešní době dochází k úspěšné implementaci souboru norem IEC 61850, která má za cíl sjednotit komunikační protokoly používané pro komunikaci různých IED, tedy i agentů v rámci MAS. Přední výrobci v oblasti elektroenergetiky na tuto normu vesměs přešli, což sebou nese benefity jako zjednodušení komunikace, snížení nákladů na propojovací kabeláž atd.

IEC 61850 specifikuje metody komunikace spolu s komunikačními protokoly a standardy pro řídicí funkce pro oblast elektroenergetiky. Soubor norem byl vytvářen nejen s ohledem na současné požadavky pro komunikaci mezi IED, ale snaží se vymezovat i dostatečný prostor pro požadavky budoucích sítí. Aplikace souboru norem přináší časové úspory, investiční úspory, zjednodušení řízení technických i ekonomických procesů v elektroenergetice.

IEC 61850 obsahuje 10 částí. Na každou z nich navazuje český ekvivalent, jak je uvedeno v tab. 5-1. Podrobnější popis souboru norem uvádí [105].

tab. 5-1: Přehled souboru norem IEC 61850

část	původní norma IEC	aktuální norma ČSN	český název normy ČSN
1	IEC/TR 61850-1	ČSN 33 4850-1	Komunikační sítě a systémy v podřízených stanicích - Část 1: Úvod a přehled
2	IEC/TS 61850-2	ČSN IEC/TS 61850-2	Komunikační sítě a systémy v podřízených stanicích - Část 2: Výklad zvláštních výrazů
3	IEC 61850-3	ČSN EN 61850-3 ED.2	Komunikační sítě a systémy pro automatizaci v energetických společnostech - Část 3: Obecné požadavky
4	IEC 61850-4	ČSN EN 61850-4 ED.2	Komunikační sítě a systémy pro automatizaci v energetických společnostech - Část 4: Systémové a projektové řízení
5	IEC 61850-5	ČSN EN 61850-5 ED.2	Komunikační sítě a systémy pro automatizaci v energetických společnostech - Část 5: Požadavky na komunikaci pro funkce a modely zařízení
6	IEC 61850-6	ČSN EN 61850-6 ED.2	Komunikační sítě a systémy pro automatizaci v energetických společnostech - Část 6: Konfigurační popisový jazyk pro komunikaci v elektrických stanicích týkající se IED
7-1	IEC 61850-7-1	ČSN EN 61850-7-1 ED.2	Komunikační sítě a systémy pro automatizaci v energetických společnostech - Část 7-1: Základní komunikační struktura - Zásady a modely
7-2	IEC 61850-7-2	ČSN EN 61850-7-2 ED.2	Komunikační sítě a systémy pro automatizaci v energetických společnostech - Část 7-2: Základní informační a komunikační struktura - Abstraktní rozhraní pro komunikační služby (ACSI)
7-3	IEC 61850-7-3	ČSN EN 61850-7-3 ED.2	Komunikační sítě a systémy pro automatizaci v energetických společnostech - Část 7-3: Základní komunikační struktura - Obecné třídy dat
7-4	IEC 61850-7-4	ČSN EN 61850-7-4 ED.2	Komunikační sítě a systémy pro automatizaci v energetických společnostech - Část 7-4: Základní komunikační struktura - Kompatibilní třídy logických uzlů a třídy datových objektů

7-4	IEC 61850-7-410	ČSN EN 61850-7-410 ED.2	Komunikační sítě a systémy pro automatizaci v energetických společnostech - Část 7-410: Základní komunikační struktura - Vodní elektrárny - Komunikace pro sledování a řízení
7-4	IEC 61850-7-420	ČSN EN 61850-7-420	Komunikační sítě a systémy pro automatizaci v energetických společnostech - Část 7-420: Základní komunikační struktura - Logické uzly pro decentralizované zdroje elektrické energie
8-1	IEC 61850-8-1	ČSN EN 61850-8-1 ED.2	Komunikační sítě a systémy pro automatizaci v energetických společnostech - Část 8-1: Mapování specifických komunikačních služeb (SCSM) - Mapování na MMS (ISO 9506-1 a ISO 9506-2) a na ISO/IEC 8802-3
8-2	IEC 61850-8-2	ČSN EN IEC 61850-8-2	Komunikační sítě a systémy pro automatizaci v energetických společnostech - Část 8-2: Mapování specifických komunikačních služeb (SCSM) - Mapování na protokol XMPP
9-2	IEC 61850-9-2	ČSN EN 61850-9-2 ed. 2	Komunikační sítě a systémy pro automatizaci v energetických společnostech - Část 9-2: Mapování specifických komunikačních služeb (SCSM) - Vzorkované hodnoty z ISO/IEC 8802-3
10	IEC 61850-10	ČSN EN 61850-10 ed. 2	Komunikační sítě a systémy pro automatizaci v energetických společnostech - Část 10: Zkoušky shody

5.6 Ochrany

Součástí agentů může být i ochranná funkce. Různé typy agentů tak, jak jsou uvedeny v kapitole 5.4, mohou realizovat funkce některých typů ochran. Se zaměřením na typy agentů, které se dají využít v MAS řešících problematiku FLISR apod., kde se právě lze setkat s agenty reprezentující ochrannou funkci, se lze setkat s funkcemi přepět'ových, podpět'ových a nadproudových ochran.

Podobně, IED umístěné v rozvodnách mohou být reprezentovány digitální ochranou, která může realizovat celou řadu algoritmů ochranných funkcí. S ohledem na charakter poruch v elektroenergetických systémech a s tím spojenou požadovanou rychlost vybavení ochrany je žádoucí, aby ochrana byla přímo součástí agenta.

Možnost realizace konkrétní ochranné funkce agenta je přímo spjata s dostupností měření daného parametru, se kterým ochranná funkce pracuje. Při úvaze schopnosti měření okamžité hodnoty napětí a proudu, lze realizovat konkrétní řadu ochranných funkcí. V rámci různých MAS se lze setkat se všemi ochrannými funkcemi uvedenými v kapitole Ochrany (strana 37, součást kapitoly 2.2.2.

6 MODELOVÁNÍ A SIMULACE

Tato kapitola je úvodem do problematiky modelování a simulací elektromagnetických jevů. Jedním ze způsobů, jak porozumět chování komplikovaných systémů, je studovat reakci při poruchách nebo parametrických variacích. Počítačová simulace je jedním ze způsobů, jak tyto reakce vyvolat (simulovat) a studovat pozorováním okamžitých nebo RMS hodnot v časové doméně nebo odezvu ve frekvenční oblasti. Samozřejmě, že využití modelů a simulačních prostředků má i další, hlubší uplatnění, které je popsáno dále v této kapitole.

Různé simulační programy se zaměřují na různé oblasti - lze nalézt programy zaměřující se např. na analýzu zkratů, stejnosměrného či střídavého elektrického oblouku, koordinaci a nastavení ochranných zařízení, toku energie (tzv. power flow studie), dimenzování vodičů a parametrů přenosových linek, spolehlivosti energetického systému, elektromagnetických přechodných jevů, dimenzování pohonů, optimalizace energetického systému, návrhu uzemnění, důsledků startu elektromotoru, stabilitu napětí, kontingenci atd. Rámec této práce je zaměřen na možnosti power flow studií a studie přechodných jevů a využívá možnosti simulačního programu PSCAD s přesahem do oblasti koordinace a komunikace různých prvků elektrického systému.

Počítačové simulace nejsou v oboru elektroenergetiky ničím novým. Provozovatelé přenosových soustav například využívají dynamické simulace v časové oblasti (dynamic time-domain simulations) k posouzení stability jejich elektroenergetických systémů. Jak už bylo zmíněno v předchozích kapitolách, požadavky k potřebě simulací vychází z požadavků různých kodexů, standardů, legislativních dokumentů – souhrnně pravidel. Informace potřebné pro určité používané druhy simulací jsou dostupnější pro velké energetické systémy. To je dáno samotnou evolucí uplatnění různých výpočtů a simulací, které zprvu nalézaly uplatnění zejména v oblasti řízení PS. Nicméně ani v oblasti DS nejsou různé výpočty a studie realizované pomocí počítačových simulací opomíjeny a zejména v posledních letech, i s ohledem na implementaci DER, dochází k jejich uplatnění. PDS často nemají tak podrobné informace o stavu a chování svých částí DS jako mají PPS – to je dáno zejména vyšší složitostí topologie a poměrem ceny měření vzhledem k přínosům, které lze pomocí měření informací získat. U PPS je navíc vazba mezi jeho sítí a DS často reprezentována měřením či modelem, který agreguje chování navazující DS jako obecného celku, což zjednodušuje popis systému. Takovou věc lze u modelování DS využít v omezenější míře, což s ohledem na množství připojení určité zdrojové základny a velkého množství spotřeby představuje složitější úlohu.

K problematice využívání různých typů modelů (které jsou uvedeny a popsány dále v této kapitole) se vážou informace uvedené v [106] a [107]. Jedná se vesměs o dotazníky, na které reagovali různí oslovení PPS a PDS po celém světě. Průzkumem (z roku 2015) bylo například zjištěno, že pro reprezentaci IBG se stále využívá reprezentace pomocí napěťového nebo proudového zdroje i pro dynamické simulace zkoumající frekvenční stabilitu a stabilitu úhlu rotoru, stejně tak, jak se pro tyto studie využívají RMS modely. EMT (Electro-Magnetic Transient) modely IBG se pak častěji využívají pro studie krátkodobé stability napětí (Short-Term Voltage Stability), překlenutí poruchy (Fault Ride Through – FRT) a další EMT studie. Měničovými zdroje – IBG, se poslední roky zabývá také pracovní skupina v rámci CIGRE.

Obecně se dá říct, že za zvyšující se poptávkou a požadavcích na dynamické modely VM může zvyšující se podíl IBG (to tedy vyvolává poptávku právě po modelu tohoto typu zdroje...) a nedostatek ověřených dynamických modelů. Dále je nutné uvést, že neexistuje dostatečný popis toho, co a jaké funkce jsou důležité pro různé typy studií elektroenergetických soustav – tzn., co

by mělo být modelováno a co lze v rozumné míře zanedbat nebo reprezentovat zjednodušeně. Tento problém neodmyslitelně zahrnuje i úvahu o tom, kdy použít RMS modely a kdy EMT model. Navíc, vzhledem k tomu, že podrobné konstrukční informace nemusí být jednoduše k dispozici pro vývoj explicitních modelů některých typů generátorů (zejména IBG), je o to větší potřeba poskytnout obecnější informace o modelování s příslušnými pokyny k jejich použití.

V rámci této práce je často odkazováno na nápovědu programu PSCAD. Tato nápověda je dostupná nejen přímo v programu, ale také online – odkazuje na ni reference [108]. Skrze její odkaz lze čerpat další informace spojené s konkrétní problematikou.

6.1 Simulace v oblasti časové vs. fázorové (EMT vs. RMS)

Obecně, vyjádření časového průběhu určitého harmonického signálu, např. napětí, v časové oblasti je vyjádřen pomocí rovnice:

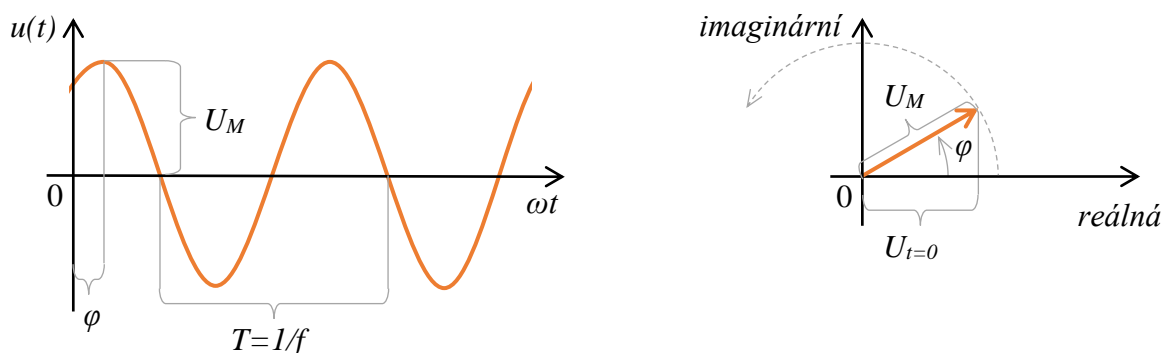
$$u(t) = U_M \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad (6.1)$$

kde $u(t)$ vyjadřuje napětí jako funkci času, U_M – maximální napětí (magnituda průběhu), ω – úhlová frekvence a φ – fázový posun. Úhlová frekvence lze vyjádřit vztahem $\omega = 2\pi f$, kde f je frekvence daného napětíového signálu. Reprezentace signálu v časové oblasti tak definuje průběh dané veličiny jako funkci času.

Vyjádření průběhu určitého harmonického signálu, např. napětí, ve fázorové oblasti lze vyjádřit rovnicí:

$$U = U_M \angle \varphi \quad (6.2)$$

kde U vyjadřuje fázor napětí, U_M – velikost tohoto fázoru a φ – počáteční natočení fázoru v čase $t = 0$. Reprezentace signálu ve fázorové oblasti tak definuje velikost a počáteční úhel veličiny. Na obr. 6-1 je grafické vyjádření rovnic 6.1 a 6.2



obr. 6-1: Grafické vyjádření rovnic 6.1 a 6.2

Vyjádření v časové oblasti tak vlastně reprezentuje projekci velikosti fázoru na časovou osu t . Interpretace veličiny ve fázorové oblasti umožňuje zkoumat interakce systému v rámci výpočtu pouze pro stejné frekvence signálu. Fázory různých frekvencí nelze sčítat. Pokud výpočtáře zajímá interakce systému na jiné frekvenci než například základní harmonické, je nutné provést výpočet interakce systému na konkrétní, pro výpočet žádané frekvenci. Naproti tomu, výsledkem výpočtu

v časové oblasti je časový průběh počítaného parametru, který je nespojitý, obvykle proložen přímkou spojující body časového kroku výpočtu. S tímto vypočteným průběhem dané veličiny lze dále pracovat. Obvykle následuje výpočet např. efektivní hodnoty, fázového posuvu, harmonických složek signálu atd. Do výpočtů v časové oblasti lze i snadněji aplikovat simulaci řídicích a komunikačních signálů, u kterých obvykle nezáleží na jejich případné reálné hodnotě, ale pouze na jejich přenosu mezi konkrétními prvky modelu a případně časovém zpoždění přenosu informace. Výpočty ve fázové oblasti jsou často použity u programů, které počítají např. power flow (nebo také load flow), tedy toky energií, statickou a dynamickou stabilitu apod a jsou označovány jako RMS. Výpočet většinou používá rovnice ustáleného stavu, při nastavení určitých počátečních a cílových podmínek, s definovanými vlastnostmi systému. Vedle toho, výpočty v časové oblasti dokážou navíc lépe zkoumat oblasti rychlejších přechodových jevů, jako jsou např. spínací děje, vypínací manipulace, zkratky a poruchy a jsou označovány jako ETM. Nevýhodou pak bývá složitost výpočtu a s tím spojen vyšší požadavek na výpočetní výkon výpočetního procesoru.

Interpolační kompatibilita

ETM simulace jsou řešeny v rámci zvoleného časového kroku simulace (solution time step). Existuje tak riziko toho, že některé jevy či děje v rámci sítě, měření, řízení či modelu VM budou díky tomu špatně interpretovány. Řeč může být o vyšších harmonických složkách či spínacích dějích v rámci IBG. Proto je vždy nutné uvážit a zvolit správný časový krok simulace! Jinými slovy to například znamená, že pokud dojde k přepínací události (porucha – zkrat, spínací impulsy tyristoru apod.) bezprostředně po intervalu časového kroku, skutečná událost bude řešena až v rámci následujícího časového kroku. Jedním ze způsobů, jak tuto nepřesnost částečně eliminovat je snížit časový krok simulace. Tím je však proporcionálně zvýšena doba výpočtu, a navíc stále nemusí být dosaženo dostatečně dobrého výsledku. Jiný způsob je použití řešení s proměnným časovým krokem simulace, kdy při detekci spínací události program rozdělí časový krok na menší intervaly. To však neobchází problém rušivých napětíových a proudových špiček kvůli rozdílům proudu a napětí při přepínání indukčních a kapacitních obvodů. Další způsob, který používá i program PSCAD je využití interpolačního algoritmu.

Interpolační algoritmus používá EMTDC k vyhledání přesného okamžiku události, pokud k ní dojde mezi časovými kroky. Toto je mnohem rychlejší a přesnější řešení než snižování časového kroku a umožňuje to přesně simulovat jakoukoli přepínací událost, při použití většího časového kroku. Některé prvky knihovny programu PSCAD (logicky ty, při jejichž funkci se může interpolace přechodu uplatnit) nabízí ve svém nastavení volbu použití interpolace (volba Interpolation compatibility, Interpolated pulse apod.). Podrobněji o této problematice hovoří návod programu PSCAD [108] v kapitolách (pod hesly) *Interpolation and Switching* a *Interpolation Compatible Components*.

6.2 Typy modelů VM

Při návrhu, sestavování nebo používání modelu jakéhokoliv systému či jeho části nebo komponenty/prvku je vždy nutné zvážit jeho správnost a použitelnost pro daný typ simulace nebo studie, která bude prováděna. Úroveň detailu modelu VM musí být řešena globálně v rámci provázanosti všech relevantních komponent, které se podílí na procesu simulace. Obecně se uvádí (viz např. [59]) nutnost vnímání detailu provedení řízení VM a detailu provedení elektrického obvodu zdroje. Současně je nutná znalost simulovaného, studovaného jevu a znalost, kde jsou použity aproximace, jak se projeví, a jaký důsledek tato zjednodušení mohou mít na výsledky simulací.

V literaturách věnujících se modelování elektroenergetických systémů se vyskytuje pojem agregované modely (aggregated models). Tyto modely zjednodušeně modelují určitou skupinu zdrojů zpravidla stejného typu. V kontextu problematiky řešené v rámci této práce jsou však agregované modely málo relevantní a jejich problematika není dále v této práci řešena.

6.2.1 Average až Full modely

Popis různých typů modelů je v detailu dosti složitá záležitost. Základní, nejjednodušší rozdělení je na tzv. *average modely* a tzv. *full modely*. Od těchto dvou, dá se říct základních pojmů reprezentující určitý detail provedení skupin modelů, se odvíjí modifikace v různých úrovních, zahrnující nebo naopak vypouštějící různé části jejich matematických popisů. Existuje nepřehledné množství publikací, které implementují nebo nějakým způsobem modifikují určité funkcionality modelu se snahou docílit vhodnosti použití jejich řešení pro určitý typ zkoumaného fenoménu nebo děje. Zkoumání a popis úrovní detailu provedení se stává tím složitější, čím je složitější popis a návaznosti různých částí modelů. Například pro model trojfázového vn vedení je relativně jednoduché popsat rozdíly mezi jednotlivými typy modelů, co se týče jejich provedení a využití. Složitější bude podobný popis pro model VM, kde je nutné uvažovat aproximace nebo naopak zvýšený detail matematického popisu a jejich provázanost a důsledky v rámci celé vazby, od měření, přes řízení, po reprezentující elektrický obvod, kdy každá z těchto částí může být provedena na různé úrovni.

Hloubku/detail matematického popisu modelu VM lze tedy řešit v rámci jednotlivých komponent, nebo lépe určitých funkčních bloků, jako je právě měření, řízení, vyjádření silové části samotného zdroje a dále provedení ochrany VM.

Modely IBG

Model IBG, stejně jako kterýkoliv model VM, je nutné při návrhu či užití vnímat v kontextu řetězce měření, řízení a silové vazby.

Silová vazba je v rámci úplných modelů měničů (full switch models nebo discrete switch models) v zásadě reprezentována exaktním modelem měniče s aplikací plného matematického popisu prvků jednotlivých komponent elektrických obvodů – zejména výkonových prvků tyristorů. Tyto modely vyžadují, aby jednotlivé spínací prvky (IGBT, dioda, tyristor atd.) byly modelovány samostatně a počítány pomocí algoritmu řešení hlavního elektrického obvodu. Spolu se zvyšující se úrovní detailu modelu střídače roste i požadavek na úroveň provedení řídicích prvků (např. generování impulsů tyristorů) a se vším potom roste i výpočetní zátěž. Výhodou použití full modelů je míra detailu, které tyto modely poskytují. Jsou vhodné vesměs pro všechny aplikace, studie, včetně návrhu designu různých funkcionalit. Správně sestavený model je výpočetně stabilní, nicméně pro přesnost potřebují jednotlivé prvky měřicí, řídicí i výkonové části zpravidla interpolační kompatibilitu (viz kapitolu na straně 115). Nevýhodou je výpočetní náročnost způsobená složitostí a množstvím použitých komponent a výpočtů. Navíc je potřeba volby nízkého výpočetního kroku simulace (v závislosti na studii i 10 μ s a méně). To v současnosti často degraduje možnost použití detailního modelu pro RT simulace¹⁶.

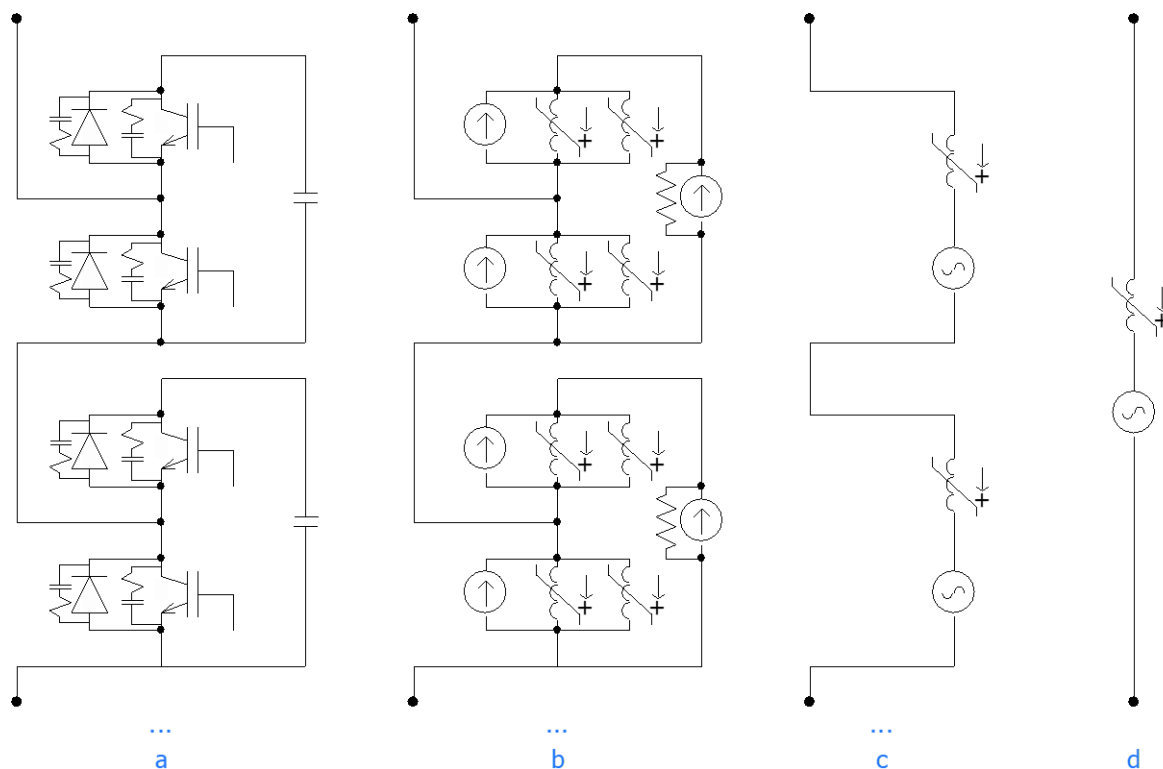
Averaged modely měničů (averaged switch models) se od exaktního pojetí modelů měničů liší degradací použitých prvků v modelu zejména v oblasti časové – spínacích časech a reprezentaci

¹⁶ Jako RT (Real-time) simulace jsou označovány počítačové simulace, jejichž výpočet, resp. výstup odpovídá chování modelovaného systému v reálném čase. Výstupy těchto softwarových výpočtů mohou být skrze příslušnou elektroniku (výstupní karty) aplikovány v reálných systémech.

spínacích dějů. Výhodou oproti full modelů je v závislosti na provedení averaged modelu zpravidla možnost volby většího časového kroku s čímž souvisí i snížená výpočetní náročnost, díky níž se některé averaged modely dají použít i v RT dynamických simulacích. K nepřesnosti také dochází v oblasti generování vyšších harmonických složek výstupního proudového signálu. Averaged modely se také méně hodí pro návrh designu funkcionalit ve stádiu vývoje IBG.

V nejjednodušší provedení modelu zdroje silová část IBG reprezentována impedancí zdroje a proudovým či napěťovým zdrojem jehož výstup je řízen podle požadovaného průběhu výstupu VM. Absencí spínaných prvků se tyto modely stávají velmi efektivní z pohledu snížení výpočetní náročnosti. Možnost volby většího časového kroku na jednu stranu urychlí simulaci, ale na druhou stranu může přinést nesprávnou interpretaci průběhu výstupního výkonu VM. Možná absence různých řídicích funkcí/komponent dělá tento typ modelu nepoužitelný pro studie designu funkcionalit či interakce v rámci provozu sítě.

Na obr. 6-2 jsou zobrazeny 4 úrovně detailu jedné větve střídače tak, jak je popisuje např. [59]. Ilustrace má dávat představu o tom, jak jsou v podstatě řešeny modely střídače v různém stádiu detailu provedení. Část *a* reprezentuje full model, části *b*, *c* a *d* pak averaged modely s tím, že řešení *d* je v podstatě nejjednodušší varianta provedení modelu IBG a lze tak reprezentovat celý zdroj. S úvahou nad těmito úrovněmi je pak jednodušší rozhodování o potřebách návazností řízení, kdy u full modelu je kromě správného nastavení všech komponent potřeba získat/zajistit i potřebné spínací pulzy výkonových prvků větve střídače. Ty, mají-li ve svém důsledku vést k řízení činného a jalového výkonu zdroje, musí být získány modulem řízení, který musí být koncipovaný v dostatečné míře detailu. Tato úloha se stává jednodušší na opačném pólu provedení – u jednoduchého modelu, kdy je výstupem modulu řízení jen požadovaná velikost a posun výstupního proudu zdroje.



obr. 6-2: Ilustrace úrovní detailu modelu jedné větve měniče

Podobně by se dala ilustrace na obr. 6-2 a její popis v principu přenést i na další prvky sítí. Obecně při návrhu modelu VM musí úroveň detailu samotného zdroje odpovídat i struktura řídicí a měřicí části.

Modely SG

Podobně jako k modelům IBG lze přistoupit i k modelování SG. V rámci average modelu lze použít napěťový či proudový zdroj řízený příslušným modulem řízení. Pro full model je pak využito komplexního popisu dějů v rámci provozu SG. Oblast popisu funkce SG je, jak už bylo zmíněno, historicky napřed oproti IBG, a tak existuje velké množství publikací popisující tuto problematiku.

S ohledem na téměř exaktní modely SG v programu PSCAD existuje spolu s nimi i rozmanitý strom nápovědy, který popisuje strukturu modelů a nastavení točivých strojů. Podrobněji o této problematice hovoří nápověda programu PSCAD [108] v kapitole *Synchronous Machine* a dalších na tuto kapitolu navazujících tématech (odkazech, kapitolách).

6.3 Stávající modely prvků sítí

Existuje několik publikací, které popisují různé modely prvků sítí. V případě zaměření na ty z nich, které se zabývají tvorbou a popisem modelů VM, lze nalézt některé relevantní podněty a informace, které se vážou k problematice řešené v této práci. Jde zejména o modely IBG, SG a agentů.

V oblasti modelování IBG jsou nejsignifikantnější výstupy dvou pracovních skupin. V rámci WECC (Western Electricity Coordinating Council)¹⁷ jde o pracovní skupinu pro modelování obnovitelných zdrojů energie (Renewable Energy Modeling Task Force) a v rámci IEC (International Electrotechnical Commission)¹⁸ jde o pracovní skupinu 27 (WG27 – Working Group 27) v rámci technického komitétu 88 (TC88 – Technical Committee 88) s názvem Wind turbines – electrical simulation models for wind power generation [103]. Některé z jejich obecných modelů (generic models) jsou použity i v některých softwarových nástrojích pro analýzu energetických systémů, např. GE PSLFTM, Siemens PTI PSS[®]E, PowerWorld Simulator a DIgSILENT PowerFactory [109], [110]. K řešení této problematiky také přispívá CIGRE skrze pracovní skupinu CIGRE C4/C6.35/Cired [60].

Obecně se modely IBG dají rozdělit z hlediska typu technologie výroby elektrické energie na větrné, fotovoltaické, mikro turbíny, palivové články a bateriové systémy. Z hlediska použití, resp. typu studie, při které se dá model využít se dá setkat s modely konstruovanými pro studie frekvenční stability, krátkodobé stability napětí, zkratů, krátkodobého nárůstu napětí, krátkodobého poklesu napětí, přechodové stability, dlouhodobé stability napětí, úhlové stability, přechodů do ostrovního provozu, spínacích přechodů, interakce řídicího systému, koordinace ochrany atd. Mnohé modely se samozřejmě dají použít na vícero druhů studií. V mnoha případech jde vesměs o podobu a nastavení řídicích obvodů zdroje. I zde se dá používané modely rozdělit na RMS a ETM modely. Podrobněji se problematikou používaných modelů zabývá studie [111].

¹⁷ WECC je společnost zajišťující provoz elektrického systému (označovaného jako BES (Bulk Electric System), což je ekvivalent českého pojmu Přenosová soustava) pro oblast západní části Severní Ameriky.

¹⁸ IEC je celosvětová členská organizace zodpovídající správu (vypracovávání, publikaci, aktualizaci) mezinárodních norem z oblasti elektroenergetiky (elektrotechnika, elektronika, sdělovací technika apod.).

6.4 Verifikace modelů

Verifikaci modelu VM lze provádět porovnáním výsledku simulace (odezvy dynamického modelu) buď s tzv. referenčním modelem (viz kapitolu 6.3), nebo s reálným měřením v časovém úseku daného testu, poruchy či rozruchu na reálném VM. U porovnání odezvy zkoumaného modelu s referenčním je zřejmé, že podmínky simulace lze, a je nutné, nastavit shodně. Zde dále přichází do úvahy zpětný vliv VM na síť. V prvním extrému pracuje VM malého výkonu do vývodu radiální sítě s velkým zkratovým výkonem – v tomto případě je vliv VM na síť relativně malý (zanedbatelný), a síť tak lze nahradit napětřovým zdrojem a příslušnou impedancí sítě. V opačném extrému pracuje VM velkého výkonu do zasmyčkové sítě, a jeho vliv na síť tak není možné (nebo není správné) zanedbat – chování VM v různých provozních stavech ovlivňuje napětřové poměry v síti, a proto je nutné správně modelovat i příslušnou část soustavy. Tato úvaha obecně přináší komplikaci pro možnosti simulací funkcionalit VM dle RfG a prolíná se i do druhé možnosti verifikace modelu VM. U porovnání odezvy zkoumaného modelu VM s reálným měřením nastává dále komplikace jednak s reprezentací sítě, do které je VM připojen a jednak s časovou synchronizací chodu simulace s reálným měřením. Simulační nástroj musí umět modelovat zdroj reprezentující síť s možností vnucení dat reálného měření. Tuto schopnost program PSCAD má. Data reálného měření jsou obvykle získána z měření v místě připojení VM na síť (např. předávací místo nebo výstupní svorky VM). Dále musí nastat úvaha o samotném vlivu zkoumaného VM na síť tak, jak je popsáno výše, z důvodu nutnosti správné modelové interpretace sítě/soustavy, do níž je zkoumaný zdroj připojen.

6.5 PSCAD

Obecně mají počítačové programy, které slouží ke studiu problematiky přechodových dějů v elektrických systémech přívlstek EMTP (Electromagnetic Transient Program). Program PSCAD toto označení rozšiřuje na EMTDC, což zahrnuje i oblast studia stejnosměrných přechodových dějů. Dá se uvést, že program PSCAD je jakási grafická nadstavba (GUI – Graphical User Interface) výpočetního základu EMTDC. Program PSCAD umožňuje uživateli graficky sestavit obvod, spustit simulaci, analyzovat výsledky a spravovat data v kompletně integrovaném grafickém prostředí. Program EMTDC je vhodný pro simulaci okamžitých odezev elektrických systémů v časové oblasti – elektromagnetických přechodových dějů (electromagnetic transients).

EMTDC ve své podstatě řeší diferenciální rovnice v časové oblasti pro elektromagnetické i elektromechanické systémy. Řešení rovnic jsou počítána na základě pevného časového kroku. Programová struktura navíc umožňuje reprezentaci řídicích systémů, ať už s přítomnými elektromagnetickými nebo elektromechanickými systémy nebo bez nich. PSCAD je tak široce využitelný pro mnoho typů studií – simulací střídavého a stejnosměrného proudu, včetně výkonové elektroniky, subsynchronní rezonance, přepětí blesku a mnoha dalších. [112]

EMTDC, jako výpočetní program programu PSCAD, je simulační nástroj, který používá výpočtů právě v časové oblasti. (Díky tomu lze lépe zkoumat i takové vazby, jako např. vliv kvality energie na funkci elektromotoru. To je možné i jednak díky tomu, že lze přesněji definovat modely strojů, které jsou samozřejmě součástí programu PSCAD.) Výsledky výpočtů EMTDC jsou prezentovány jako průběh okamžitých hodnot v čase. Následným výpočtem je pak možné výsledky interpretovat i jako fázory či průběhy efektivních hodnot – podobně jak jsou interpretována reálná měření. Na rozdíl od programů, které počítají load flow nebo stabilitu pomocí rovnic ustáleného stavu, kdy je zpravidla počítáno pouze se základní frekvencí, EMTDC dokáže sledovat odezvu

systému na všech frekvencích, s přesností závislou na uživatelem zvoleném časovém kroku výpočtu. [112] O přesnosti výpočtu v rámci závislosti velikosti frekvenci a časového kroku simulace pojednává studie *Benchmark 01* (viz kapitolu 11.3.1, na straně 304).

Program PSCAD je používán inženýry a vědci mnoha institucí po celém světě. Používá se především při plánování a návrhu elektroenergetického systému, uvádění do provozu, provozu, přípravě specifikace výběrového řízení, výuce a pokročilému výzkumu. Ve [112] jsou uvedeny příklady konkrétních studií a dějů, které se dají s výhodou zkoumat díky výpočtům EMTDC. Jedná se o kontingenční studie (analýzy) střídavých i stejnosměrných sítí sestávajících z rotačních strojů (vč. budičů, regulátorů, turbín), transformátorů, přenosových vedení, kabelů a zátěží, na kterých lze zkoumat např. koordinaci ochran; důsledky nasycení transformátoru; přepětí způsobené poruchou nebo přerušením provozu; izolační koordinace transformátorů, jističů a svodičů; impulzní testování transformátorů; subsynchronní rezonance sítí se stroji, přenosovými linkami a systémy HVDC; vyhodnocení návrhu filtru; harmonickou analýzu včetně rezonance; návrh a koordinaci řídicích systémů FACTS a HVDC; včetně STATCOM, VSC atd.; pohony různých typů s proměnnou rychlostí, včetně cyklokonvertorů; optimální návrh parametrů regulátoru; průmyslové systémy včetně kompenzačních regulátorů, pohonů, elektrických pecí, filtrů atd.; nové koncepce sítí a řízení; důsledky úderu blesku, poruch a spínacích operací; pulzní účinky dieselových motorů a větrných turbín na elektrické sítě atd. Platforma programu PSCAD tak nabízí téměř všechny potřebné nástroje ke studiu konceptů a funkcionalit chytrých sítí.

6.5.1 Uživatelský interface programu PSCAD

Dále v textu, především v kapitole 10, jsou užívány určité pojmy, které jsou popsány v této podkapitole. Součástí každé vytvořené komponenty (modul nebo definice) i každého prvku ze základní knihovny prvků programu PSCAD je uživatelské rozhraní, kde je možno nastavit konkrétní parametry prvku. K tomuto uživatelskému rozhraní je možno se dostat vícero způsoby. Nejjednodušší cesta je dvojklik levým tlačítkem myši na daný prvek, který je součástí hlavní knihovny, nebo definici. Pro otevření dialogového okna uživatelského nastavení modulu je třeba při dvojkliku přidržit klávesu ctrl. Druhou cestou, která vede k zobrazení uživatelského rozhraní v podobě dialogového okna je kliknutí pravým tlačítkem myši na konkrétní prvek a vybrání položky *Edit Parameters...* Poslední, a možná nejpřehlednější způsob je vyvolání uživatelského rozhraní jedním klikem levým tlačítkem myši na daný prvek při zobrazeném panelu *Component Parameters* (nabídka horní lišty v záložce *View*, ikona *Panes*, volba *Component Parameters* zobrazí dané okno, které je možné nejvýhodněji umístit/připnout k pravému okraji pracovní plochy programu).

Samotné uživatelské rozhraní je rozděleno na **záložky**, **skupiny** a **parametry**. Tyto pojmy jsou ukázány na obr. 6-3. *Záložky* a *skupiny* rozčleňují uživatelem nastavitelné *parametry* do přehlednějších celků. To, co uživatel nastavuje je právě *parametr*.

Důležitou součástí možností nastavení jsou informace o **typu proměnné** a **datovém typu**. Samotný nastavitelný parametr má mimo jiné dvě základní vlastnosti. První je *typ proměnné*. Jedná se o informaci, která je uvedena ve spodním poli dialogového okna nastavení prvku pod označením *Type*. Informace ve spodním poli dialogového okna nastavení prvku se zobrazí po označení konkrétního parametru v nabídce. Jedná se o první informaci, např. *Type=Real* nebo *Type=Choice*. Na základě typu proměnné je uživateli umožněno nastavit určitou hodnotu daného parametru. Typy proměnné mohou být:

- *Integer* – možnost zadání pouze celočíselné hodnoty,

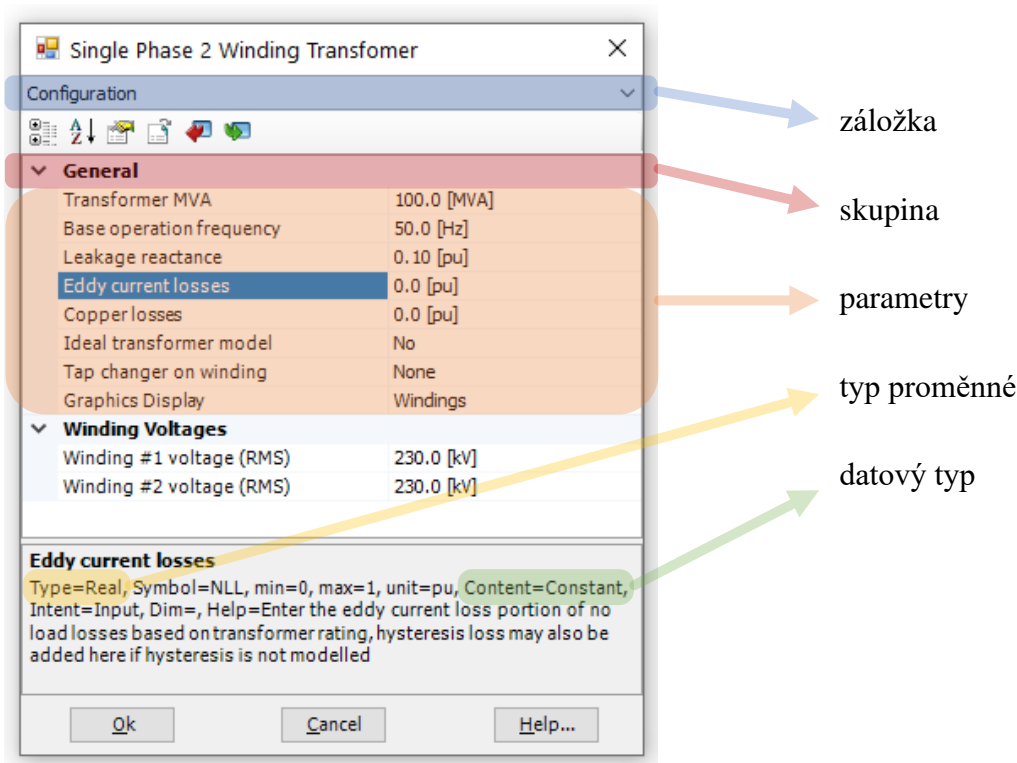
- *Real* – možnost zadání reálného čísla,
- *Text* – možnost zadání textu,
- *Choice* – možnost volby z definované nabídky,
- *Boolean* – možnost vybrání stavu binární hodnoty,
- *Logical* – možnost zadání binárního stavu.

Všechny tyto možnosti jsou limitovány nastavením rozmezí možných hodnot nastavení. To je zřejmé u typů *Choice*, *Boolean* a *Logical*. Typ proměnné *Text* je omezen znaky anglické klávesnice (ne množstvím znaků). Typy *Integer* a *Real* mohou být omezeny předepsanými limity, které stanovil autor parametru daného prvku. Toto rozmezí možného nastavení typů *Integer* a *Real* je uvedeno ve spodním poli dialogového okna nastavení prvku jako min a max, např. min=0, max=+1e+308.

Druhá důležitá vlastnost je *datový typ*. U parametrů s *typem proměnné Integer*, *Real* nebo *Logical* je vždy ve spodním poli dialogového okna nastavení prvku uveden jejich datový typ – Content=Literal, Content=Constant nebo Content=Variable. Tato informace definuje uživateli možnosti zadání parametru a také jeho vlastnosti v průběhu simulace. Datové typy jsou:

- *Literal* – definuje fixní hodnotu daného parametru po celou dobu simulace,
- *Constant* – definuje také fixní hodnotu daného parametru po celou dobu simulace, ale na rozdíl od typu *Literal* dovoluje parametr zadat proměnnou, kterou pak uživatel musí definovat na pracovní ploše, kde se prvek s takto nastaveným parametrem nachází, a musí být poskytnut vstupem, který má také pevný charakter (např. prvek *Real Constant* (viz hlavní knihovnu, sekci Miscellaneous)
- *Variable* – definuje parametr buď jako číslo nebo proměnnou, podobně jako u typu *Constant*, s tím rozdílem, že hodnota proměnné se může měnit v průběhu simulace.

S každým datovým typem pracuje program PSCAD odlišně. Zjevná výhoda datového typu *Variable*, u kterého je možno nahrazovat hodnotu parametru proměnnou proměnlivou po čas simulace je vykoupena právě výpočtově náročnějším zpracováním při sestavování simulace (navíc s nutností alokace většího množství paměti), což se projevuje i při běhu samotné simulace zvýšenou výpočetní náročností, ergo pomalejším během simulace.



obr. 6-3: Základní členění uživatelského rozhraní prvku v programu PSCAD

Doplňující informace k tomuto tématu jsou uvedeny v nápovědě programu PSCAD pod hesly *Input Field* (odkazující na záložku *Value Fields*) a *Editing Component or Module Parameters*.

6.5.2 Definice a Fortran

Pro realizaci řešení určitého výpočetního, procesního nebo řídicího algoritmu je v konkrétních případech výhodnější použít místo sestavy prvků ze základní knihovny programu PSCAD přímo programovacího jazyka a sestavit algoritmus pomocí příkazů. Opodstatnění tohoto postupu je například při složitějším podmínkování, kdy do algoritmu vstupuje více proměnných. Sestava některých složitějších algoritmů pomocí prvků funkcí a analogových a digitálních řídicích bloků je podstatně složitější (i výpočetně náročnější) než pomocí příkazů programovacího jazyka.

Program PSCAD pracuje na bázi programovacího jazyka Fortran a nabízí možnost implementovat vlastní výpočetní algoritmus psaný v tomto jazyku. Uživatel tak může vytvořit vlastní modul – prvek, který má vlastní vstupy, výstupy, vnitřní proměnné, grafickou podobu a samotný skript funkce. Takový prvek je v programu PSCAD označován jako *definice*. V rámci skriptu lze definovat segmenty, z nichž každý plní určitou funkci. Definice nemusí obsahovat všechny segmenty. Volba segmentů závisí na tom, jestli jsou například nutné nějaké předběžné výpočty, jestli jde o definici elektrické součástky, jestli je použit zdrojový kód atp.

Možnosti vytvořit vlastní definice je využito i v praktické části této práce, v jejímž popisu v kapitole 10 jsou konkrétní definice uvedeny a popsány.

6.6 knihovna prvků programu PSCAD

Knihovna programu PSCAD obsahuje velké množství prvků, které se dají použít pro kompozici či sestavu konkrétní simulace či konkrétního modelu. Jedná se jak o prvky silové, které reprezentují prvky sítě a definují chování simulovaného elektrického systému, tak o prvky funkcí, které reprezentují například funkce výpočtů, exekutivy řízení apod. Odtud lze rozdělit prvky do dvou

skupin – prvky pracující se silovým signálem a prvky pracující s datovým signálem. Pojmy silový a datový signálu je v rámci programových výpočtů irelevantní, nicméně nabízí pomyslně představu o účelu a návaznosti každého prvku. Prvky pracující se silovými prvky se uplatní přímo ve výpočetní matici výpočtu elektroenergetického systému programu. Prvky pracující s datovým signálem plní roli řídicích, výpočetních a informačních funkcí.

V této podkapitole jsou popsány některé problematiky z oblasti modelování v programu PSCAD. Výčet všech relevantních podrobností k této práci by byl vyčerpávající a neúčelný. Následující popis se tak vztahuje k problematice simulací, kterou je nutné popsat s návazností do praktické části této práce.

On-Line Frequency Scanner

Problematika měření frekvence je obecně i v praxi tématem, který je zejména v rámci digitalizovaných systémů dosti probírán. V simulačním prostředí programů je nutno opřít se při vyhodnocování frekvence o průběh okamžitých hodnot, jejichž hustota, v přeneseném smyslu vzorkovací frekvence, je dána výpočetním krokem simulace (t_{step}). Výpočetního krok 50 μs (což odpovídá defaultnímu/standartnímu nastavení programu a kroku, který je dostačující pro většinu typů simulací) odpovídá vzorkovací frekvenci 20 kS/s.

V základní knihovně programu PSCAD jsou dva prvky, pomocí nich lze určit frekvenci signálu. Prvním je logicky *On-Line Frequency Scanner*, druhým je *Frequency/Phase/RMS Meter*. *Frequency/Phase/RMS Meter* počítá frekvenci základní harmonické pomocí šesti po sobě jdoucích průchodů nulou všech tří fází napětí. Prvek *Frequency/Phase/RMS Meter* se připojuje přímo k „silovému“ signálu, což na jednu stranu zjednodušuje jeho použití, na druhou pak znemožňuje pre-procesing signálu. Prvek *Frequency/Phase/RMS Meter* dostatečně rychle a správně určuje frekvenci v případě systému, kde se vyskytuje pouze základní harmonická napětí. Avšak prvek je nepoužitelný v případě výskytu dalších harmonických složek, což zapříčiňuje nemožnost jeho použití v rámci modelů postulovaných v praktické části této práce. (Touto problematikou se mimo jiné zabývá *Benchmark 02* uvedený v kapitole 11.3.2)

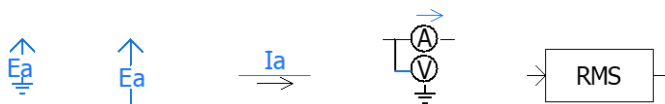
Důležitým parametrem v nastavení prvku *On-Line Frequency Scanner* je počet harmonických (*Number of Harmonics*), které budou použity k výpočtu frekvence. Tato volba je důležitá nejen z pohledu přesnosti algoritmu výpočtu frekvence. Spolu s volbou základní frekvence (*Base Frequency*) udává i minimální krok výpočtu dané simulace. Následující tab. 6-1 ukazuje minimální výpočetní krok simulace (t_{step}) v jednotkách μs , který musí být nastaven, aby mohl být proveden výpočet frekvence pomocí daného prvku. V tab. 6-1 je uvedeno rozmezí frekvence od 50 do 53 Hz z toho důvodu, protože uživatel musí prvek nastavit podle nejvyšší frekvence, která se během simulace objeví. (Například, pokud je výpočetní krok nastaven na 38 μs a v průběhu simulace nastane situace, kdy se frekvence dostane nad hodnotu 51,4 Hz, simulace se automaticky ukončí. (I přesto, že základní frekvence v prvku je nastavena na 50 Hz)).

tab. 6-1: Maximální výpočetní krok simulace pro danou frekvenci a počet harmonických

f (Hz)	Počet harmonických (Number of Harmonics)					
	7	15	31	63	127	255
50,0	1250,00 μ s	625,00 μ s	312,50 μ s	156,25 μ s	78,13 μ s	39,06 μ s
50,5	1237,62 μ s	618,81 μ s	309,41 μ s	154,70 μ s	77,35 μ s	38,68 μ s
51,0	1225,49 μ s	612,75 μ s	306,37 μ s	153,19 μ s	76,59 μ s	38,30 μ s
51,5	1213,59 μ s	606,80 μ s	303,40 μ s	151,70 μ s	75,85 μ s	37,92 μ s
52,0	1201,92 μ s	600,96 μ s	300,48 μ s	150,24 μ s	75,12 μ s	37,56 μ s
52,5	1190,48 μ s	595,24 μ s	297,62 μ s	148,81 μ s	74,40 μ s	37,20 μ s
53,0	1179,25 μ s	589,62 μ s	294,81 μ s	147,41 μ s	73,70 μ s	36,85 μ s

Vliv nastaveného počtu harmonických se promítne při reakci na změnu frekvence. Roli hrají také harmonické složky navázané na základní harmonickou frekvence. V rámci použití v modelech postulovaných v praktické části této práce lze s dostatečnou přesností použít pro výpočet frekvence pomocí prvku *On-Line Frequency Scanner* 7 harmonických.

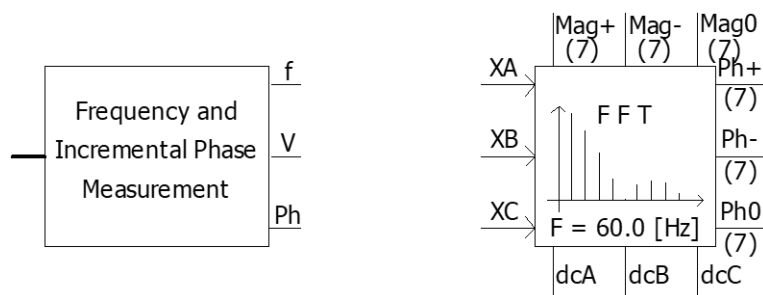
6.6.1 Měření napětí a proudu



obr. 6-4: Prvky měření napětí a proudu

Měření fyzikálních veličin elektrického proudu a napětí je v simulacích prováděno pomocí prvku voltmetru (*Voltmeter to Ground – master:voltmetergnd* resp. *Voltmeter – master:voltmeter*), který v každém kroku simulace měří okamžitou hodnotu napětí mezi uzlem a zemí či jiným potenciálem, ampérmetru (*Current Meter – master:ammeter*), který měří okamžitý protékající proud konkrétním místem obvodu v každém kroku simulace, nebo multimetru (*Multimeter – master:multimeter*), který měří stejné veličiny, jako předchozí dva prvky. Všechny tyto prvky lze použít jak v 1f, tak v 3f variantě/soustavě. Výhodou prvku multimetru je dále možnost rovnou získávat i další hodnoty, jako jsou činný a jalový výkon, efektivní hodnota napětí a proudu a fázový úhel napětí (théta). Výpočet hodnot činného a jalového výkonu a efektivních hodnot napětí a proudu lze dále parametrizovat volbou vyhlazovací časové konstanty (smoothing time constant) a základní systémové frekvence. Pro další parametrizaci výpočtu efektivních hodnot napětí a proudů lze použít prvku pro výpočet efektivních hodnot (*Single Phase RMS Meter – master:rms-inst*) kde lze samostatně dále nastavit i počet vzorků ve výpočetním cyklu, čímž lze do jisté míry simulovat chování digitálního voltmetru či ampérmetru (samozřejmě s ohledem na časový krok simulace (t_{step})).

6.6.2 Měření frekvence



obr. 6-5: Prvky měření frekvence

Důležitou součástí měření veličin elektrických obvodů je měření frekvence. Pro měření frekvence v rámci programu PSCAD existují dva prvky z knihovny měření (*Frequency/Phase/RMS meter – master:freq-meas* a *On-Line Frequency Scanner – master:fft*).

Frequency/Phase/RMS Meter vypočítává frekvenci z měření šesti průchodů nulou (zero-crossing) signálů z měření 3-fázového vstupního napětí. Jde tedy o plovoucí okno vyhodnocující velikost frekvence každých 0,02/6 sekund (při frekvenci 50 Hz). Je zřejmé, že na měření velikosti frekvence pomocí toho prvku budou mít vliv harmonické složky superponované na nosnou/základní frekvenci. Prvek se připojuje přímo do měřeného uzlu – nepracuje s datovými signály, což znemožňuje použití jakéhokoliv výpočetního filtru pro odstranění superponovaných signálů.

Na proti tomu prvek On-Line Frequency Scanner pracuje s datovými signály zpravidla získanými pomocí prvků měření napětí či proudu. Jednou z jeho funkcí je proces rychlé Fourierovy transformace (FFT – Fast Fourier Transform) pro získání harmonických složek (velikostí a fází) vstupního signálu. V nápovědě programu PSCAD bohužel není uveden kompletní algoritmus procesu získání okamžité hodnoty frekvence. Jedinou informací je, že proces zahrnuje filtrování (dolní propust (LPF – Low-Pass Filtering)) jako funkci anti-aliasingu, dále vzorkování a Fourierovu transformaci, a nakonec opravu chyb velikostí a fází. Pro „správné měření“ frekvence je nutné v modulu povolit funkci sledování frekvence (*Frequency tracking? – yes*) a antialiasingu (*Anti-aliasing filter? – yes*). Při použití tohoto prvku je vhodné použít takový časový krok simulace (t_{step}), který je celočíselným podílem periody základní harmonické.

V modelech prvků v rámci této práce je použit pouze druhý jmenovaný prvek měření frekvence (– přesnost a správnost na úkor výpočetního času). Problematikou určování frekvence se také zabývá *Benchmark 02* (kapitola 11.3.2).

Cílem měření frekvence v rámci simulace není vždy snaha o určení správné frekvence. V simulačním prostředí může jít často o simulaci reálného algoritmu pro vyhodnocení frekvence, který má pak logicky vliv na všechny ostatní návaznosti využívající právě tuto informaci. Toto ostatně platí i o všech ostatních měřeních, výpočtech, algoritmech a návaznostech, které se dají v simulačním prostředí realizovat. Ostatně tato úvaha se prolíná celým řešením této práce.

6.6.3 Komunikace

Komunikace mezi jednotlivými prvky není v praktické části modelována jako reálná. Přenos informace mezi jednotlivými prvky sítě probíhá souběžně s kroky simulace. Např. vyšle-li prvek X komunikační zprávu prvku Y v čase t_1 , obdrží prvek Y zprávu v čase t_2 , kdy rozdíl mezi t_1 a t_2 je právě jeden krok simulace (t_{step}).

V rámci knihovny programu PSCAD je pro přenos informace mezi moduly vytvořen prvek pro „bezdrátovou“ komunikaci. Výhodou je, že u těchto prvků nemusí být komunikační cesta v programu PSCAD vedena vizuálně, spojením vysílače a přijímače, ale prvky vysílače a přijímače lze spárovat definováním cesty umístění protějšího prvku. Pro oboustrannou komunikaci je nutné v každém modulu použít vysílač (transmitter) i přijímač (receiver). Nespornou výhodou použitého prvku je možnost přenášet řadu signálů najednou (jednorozměrné pole, řádkovou/sloupcovou matici) a možnost informací přenášet napříč moduly.

7 DOSAVADNÍ VÝVOJ A SOUČASNÝ STAV

Informace uvedené v předchozích kapitolách se dají uvést do kontextu současného stavu výzkumu, vývoje a implementace v konkrétních úrovních k této práci relevantních problematik.

Je potřeba popsat stav dosavadního vývoje, který koresponduje s řešenou problematikou. Jde o to, vymezit a definovat používané a testované metody a prvky sítí tak, aby na základě těchto podkladů a předpokladů mohlo být v další části této práce vytvořeno schéma a možnosti nastavení chování použitých funkcionalit. Celá popisovaná problematika samozřejmě nemůže postihnout každý aspekt do detailu, a proto některé elementy, které není nutné studovat podrobně, je možné zahrnout do oblasti zjednodušujících předpokladů. Mezi tyto patří například technologie komunikace (typ komunikace, komunikační protokoly atd.) nebo volba konkrétního typu inteligentního přístroje instalovaného v síti. V úvahu jsou vzaty pouze provozní vlastnosti, které lze a je nutné implementovat do vytvořených modelů v rámci funkce jejich určení.

Popisované oblasti dosavadního vývoje v následujících podkapitolách se do značné míry překrývají, proto rozdělení do následujících podkapitol nesmí být vnímáno jako striktní.

7.1 Vlastnosti zdrojů

Tato návaznost je předmětem kapitoly 3. S ohledem na platnou legislativu, ale i směr vývoje oboru elektroenergetiky lze současný stav chápat jako přechod či, možná trochu nadneseně, pokus o transformaci energetiky. Více pravděpodobněji jde spíše o postupný vývoj odvětví, které reaguje na stav technického pokroku a společenských potřeb.

Současný zvyšující se podíl DER přináší nové výzvy, které je nutné řešit. Jde například o problematiku zvyšování napětí v síti (z důvodu dodávky činného výkonu rozptýlenými VM). Tento stav nemusí být nežádoucí, nicméně musí existovat nástroje – především požadavky na VM, které budou schopny řešit případné nestandardní stavy provozu sítě. Nástrojem mohou být funkce VM mající za úkol regulovat parametry výstupní energie VM na požadované hodnoty (napětí, činný výkon, jalový výkon, účinník, frekvence).

Spolu s požadavky na vlastnosti a funkce VM jsou v současné době implementovány i požadavky na ověřování vlastností VM jednak pomocí fyzických testů, ale jednak i pomocí simulací. Tato oblast nabízí široké pole uplatnění modelů VM, skrze které lze ověřovat požadavky na jejich vlastnosti a funkce. Odrazovým dokumentem pro motivaci řešit problematiku modelování VM a simulace se stal RfG.

7.2 Ostrovní provoz

Vývoj na poli možností udržení chodu vyčleněných částí sítě v OP při poruše v nadřazené síti je v současné době řešeno na mnoha úrovních. Vedle teoretické roviny se v hojné míře vyskytují pilotní projekty (které jsou často elementy projektů zaměřených na chytré sítě a jsou pod záštitou distribučních společností a dalších subjektů působících v elektrotechnickém odvětví), které se snaží implementovat nové funkcionality elektrických sítí, právě včetně možností OP. Problematika OP je samozřejmě řešena i návaznosti na platné dokumenty jako Kodex PS, PPDS, RfG apod.

Problematika OP je vymezena v kapitole 4. Z pohledu řešení problematiky přechodu z a do OP a samotného provozu VM v ostrovním režimu se toto téma prolíná s problematikou mikrosítí, jejichž vymezení z pohledu vlastností a funkcí VM a agentů téměř odpovídá problematice mikrosítí. V procesu řízení chodu sítí není pojem OP ničím novým, nicméně právě možnými

vlastnostmi současných a budoucích DER lze renesanci problematiky ostrovních provozů v prvních instancích zkoumání globálních (celoostrovních) návazností řešit nefyzicky, skrze příslušné modely prvků ES. Testování chování všech návazností OP v reálném provozu sítě je zatíženo rizikem ztráty bezpečného chodu ostrovního systému, což může mít zbytečné ekonomické následky. Naopak testování OP, resp. vlastností prvků sítě v rámci daného ostrova, pomocí počítačových simulací přináší větší variabilitu a menší důsledek v případě selhání dané struktury řízení chodu sítě/ostrova.

7.3 Multi-Agent Systems – multiagentní systémy

MAS, ač jsou v různých projektech nazývány a chápány různě, jsou v mnoha ohledech dobrým způsobem, jak řešit spolehlivost chodu sítě s ohledem na poruchy v síti a možnosti začleňování distribuovaných zdrojů.

Jak bylo uvedeno v kapitole 5, MAS lze využít k celé řadě funkcí – od řešení poruchových stavů s cílem rekonfigurace sítě a obnovy provozu, přes problematiku ostrovních provozů, až po provozně optimalizační procesy. Literatura citovaná právě v rámci kapitoly 5 odkazuje zpravidla na odborné publikace a reporty studií, které se snaží tento relativně nový obor aplikovat do rámce provozu současných či budoucích sítí.

V rámci MAS se dostává do popředí pojem FLISR a všechny mutace akronymů podobného významu a jedná se o oblast vývoje funkcí moderních, ve které lze s výhodami použít softwarového prostředí a simulace.

7.4 Modelování a simulace

V současné době existuje spousta programů, které umožňují modelování a simulaci různých prvků a dějů odehrávajících se v rámci elektrické sítě. Společným prvkem těchto programů je, že ve svých knihovnách nabízejí spoustu komponent, díky kterým lze sestavit téměř jakýkoliv elektrický obvod, včetně řídicích a regulačních návazností. Tímto dávají uživateli možnost sestavit požadovaný model systému a možnost provést potřebné simulace různých dějů. Variabilitu a široké spektrum použití dále často navyšuje možnost doplnit modely o moduly, jejichž funkce je dána popisem uživatele pomocí programovacího jazyka (nejčastěji C, dále Fortran aj.; některé programy nabízejí např. možnost definovat funkci modulu pomocí souboru vytvořeného v programu MatLab, C++ apod.). Značnou nevýhodou stávajících simulačních programů však je, že ve svých knihovnách nenabízejí komplexní modely prvků elektrizační soustavy. Toto se ostatně stalo jednou z motivací této práce. Důvodem je logicky zbytečná složitost a tím i výpočetní náročnost komplexního prvku, neboť ten obsahuje i funkcionality, které v rámci určité simulace zaměřené na dílčí problém nejsou využity. Příkladem můžou být fázovací obvody či elektrické (příp. i technologické) ochrany modelu zdroje elektrické energie, které jsou nevyužity při simulacích zaměřujících se např. na toky výkonů v určitém modelovaném systému. Tyto funkcionality, ač nejsou využity, jsou kompilovány a v průběhu simulací zatěžují výpočetní výkon pracovního výpočetního stanice. Nicméně právě existence komplexního modelu určitého prvku ES je obecně žádaná právě z důvodu sestavy a parametrizace simulovaného systému.

7.4.1 Modely VM

V současné době existuje vícero pracovních skupin zabývajících se problematikou modelování různých typů VM. V následujících odstavcích jsou uvedeny informace k významnějším a pro tuto práci relevantním projektům, studiím či pracím.

Za významný lze považovat mezinárodní standart IEC 61400-27-1:2015 [113], který specifikuje dynamické simulační modely různé typy větrných turbín, různých konceptů a konfigurací. Definuje obecné pojmy a parametry za účelem stanovení elektrických charakteristik větrných turbín v místě jejich připojení k síti. Dynamické simulační modely jsou popsány modulárním způsobem, který lze použít i pro budoucí koncepty větrných turbín. Modely čtyř základních typů větrných turbín obsahují další návaznosti – ochrany, mechanika turbíny, schopnost regulace jalového výkonu, příslušná měření a řízení. Model naopak neobsahuje např. rozhraní pro řízení v různých režimech provozu, ani návaznosti na simulace souladu dle RfG. S cca dvouletou časovou prodlevou se v databázích vědeckých publikací začaly objevovat příspěvky (např. [114], [115], [116], [117] a [118]) doplňující a validující zmiňované dynamické simulační modely v různých simulačních programech – PSS/E (Siemens PTI), Netomac (Siemens), Eurostag (Tractebel/RTE), PowerFactory (DIgSILENT), SICRE (CESI), Neplan (Neplan AG), Matlab Simulink (SENVION and Gamesa), Modelica (DTU). Spolu s tímto vznikají tzv. prováděcí směrnice (implementation guidelines) pro tyto simulační programy [119]. IEC 61400-27-1:2015 má návaznost na modely WECC popsané v dalším odstavci.

Modely VM větrných a fotovoltaických elektráren vzniklých v rámci pracovní skupiny pro modelování obnovitelných zdrojů energie (REMTF - Renewable Energy Modeling Task Force), která je součástí americké organizace WECC, tvoří modelovou základnu pro relativně široké využití. Mimo definovaných základních čtyřech typů topologií generátorů větrných turbín jejichž vlastnosti jsou popsány např. v [120], je podobně popsána i problematika interpretace fotovoltaických zdrojů [121] – jedná se o pokyny (guidelines) popisující vlastnosti obecných modelů (generic models) a doporučený přístup k dalšímu použití. Srovnání modelů WECC a IEC (dle IEC 61400-27-1:2015) je uvedeno v [122].

PSCAD jako celosvětově rozšířená platforma také nabízí konkrétní modely VM. Jedná se například o aplikace větrných a fotovoltaických elektráren. Skrze odkaz [123] resp. [124] jsou dostupné projekty s modely zmíněných čtyř typů topologií generátorů větrných turbín, resp. fotovoltaického systému a fotovoltaické farmy. Projekty řeší konkrétní aplikaci VM a nenabízí např. možnosti přechodů mezi různými režimy provozu zdroje a aktivaci dalších funkcí jako například frekvenčně závislé režimy, PQU regulace atd.

7.5 Shrnutí kapitoly

Počítačové simulace elektroenergetických dějů se stávají velmi rozšířené a dostupné. Lze dohledat mnoho informačních zdrojů popisujících komplexní problematiku modelování a simulací dějů v elektrotechnice. V kontextu zaměření této práce byla v této kapitole uvedena celá řada příkladů aplikací a odkazů na konkrétní informační majících souvislost s řešenou problematikou.

Na poli modelování **VM** pro různé typy aplikací existuje celá řada modelů. Základním výstupním údajem pro modely je matematický popis chování mechanických, elektromechanických a dynamických vlastností dějů, které reálně probíhají v síti. Nadstavbou se pak stávají řídicí a regulační obvody, které je nutné určitým způsobem definovat a nastavit. Na toto navazují další funkcionality jako například měřicí systém (zpracování měření), ochranné funkce, uživatelské rozhraní apod. Modely VM publikované v dostupné literatuře se však většinou vztahují na konkrétní typ VM a konkrétní aplikaci. Chybí obecně přijatelný model, který by svou robustností dokázal pokrýt požadavky uživatele v širším spektru aplikací.

V oboru definice vlastností modelů **agentů** je situace podstatně jednodušší. Funkce agentů jsou přesněji definovány a jejich celkové množství v míře kombinací různých funkcionalit je lépe

obecně popsatelné. Navíc agenti vesměs neobsahují regulační obvody, nýbrž povětšinou pouze logické/rozhodovací funkce. To přináší jasnější a snadnější popis struktur a vlastností agentů. Nicméně opět neexistuje popis komplexního modelu agenta, který by dokázal pokrýt požadavky uživatele v širokém spektru aplikací.

8 CÍLE PRÁCE

Shrnutím předchozích kapitol lze pro tuto práci definovat zřejmé vstupy. Jsou jimi zejména možné dostupné technologie a současný stav poznání z hlediska využívání technologií – stav topologií současných i budoucích sítí, jejich principy a techniky řízení, výrobní moduly uplatňované v rámci provozu a jejich možnosti řízení v rámci synchronního i ostrovního provozu, možnosti MAS a možnosti počítačového modelování a simulací.

Shrnutím předchozích kapitol lze také definovat výzvy, které by mohly nebo měly být s výhodou řešeny pomocí počítačových simulací. Především studie důsledků nových požadavků na prvky sítí, specifických stavů a nových funkcionalit elektrických sítí je do značné míry výhodné testovat pomocí počítačových simulací. Při zamyšlení se nad širší možností modelování elektroenergetických systémů je nutné zvážit, jak by měly modely prvků takového systému vypadat, jaká kritéria by měly splňovat, co by u nich mělo být možné nastavit a celkově, jak by měly fungovat. Účelem je stanovit obecné požadavky na modely prvků elektroenergetického systému tak, aby se na tento podklad dalo v následujících částech této práce navázat, s cílem vytvořit kvalitní modelovou základnu se širokou mírou uplatnění.

Cílem práce je tvorba a popis modelů prvků ES v prostředí programu PSCAD a validace jejich funkce. Výsledkem bude knihovna konkrétních prvků ES, které budou snadno použitelné pro široké spektrum simulací různých stavů, dějů a konfigurací. Praktickou návaznost cílů této práce lze shledat v ohledu na současné trendy při rozvoji nejen elektrických sítí, ale např. i strojírenství a stavebnictví, a to v použití softwarových simulačních prostředků. Tento trend sebou obecně nese možnost úspory nemalého množství nákladů a možnost do určité míry otestovat navrhované řešení. S modely zdrojů je koneckonců počítáno jako s prostředkem pro ověřování splnění podmínek provozovatele soustavy pro připojení samotných zdrojů.

8.1 Požadavky na generátory (RfG)

S ohledem na požadavky pro připojování nových zdrojů do ES, jak bylo popsáno v kapitole 3.1, je jedním z prvořadých požadavků na modely zdrojů nutnost zahrnutí požadovaných funkcionalit dle **nařízení Komise (EU) 2016/631** [1]. Nařízení samo o sobě definuje některé požadavky na různé typy výrobních modulů. Postulované modely zdrojů musí mít nastavitelné vlastnosti a funkce tak, aby mohly být použity pro simulace za účelem ověření splnění požadavků nařízení. Na to navazují národní požadavky definované v PPDS a dalších normách.

8.2 Požadavky na vlastnosti zdrojů

Problematika připojování většího množství distribuovaných zdrojů elektrické energie sebou nese řadu problémů a neznámých, které je nutné řešit a studovat. Postulované modely zdrojů musí mít nastavitelné vlastnosti a funkce tak, jak je stanovují **požadavky EN 50549-1** [48], resp. **EN 50549-2** [49]. Je nutné řešit důsledky různého **nastavení výkonových charakteristik** zdroje, vč. jejich provázaností s ostatními zdroji v síti. S ohledem na úbytek podílu zdrojové základny využívající synchronní generátory je vhodné mít možnost studovat chování **umělé setrvačnosti** a **dodávky rychlého poruchového proudu** u zdrojů využívajících měniče. Jedná se o vlastnosti, které NVM nemají přirozeně oproti SVM, ale dají se implementovat uměle v rámci funkcí řízení.

8.3 Ostrovní provozy a resynchronizace

Jednou z požadovaných obecných funkcí tzv. chytrých sítí má být schopnost elektroenergetického systému reagovat na hraniční provozní podmínky sítě přechodem vyčleněné části soustavy do OP, včetně jejich detekce a schopnosti návratu do synchronního provozu se zbytkem soustavy. Postulované modely musí nabízet takové funkcionality, které budou schopny simulovat nejen **přechod do OP**, ale i chování a **spolupráci zdrojů a spotřeby** během OP. Nedílnou součástí pak musí být i schopnost **resynchronizace** ostrova se zbytkem soustavy.

8.4 Multiagentní systémy

Relativně novým pojmem, který se dá chápat jako vlastnost chytrých sítí je problematika MAS. Na teoretické úrovni existuje celá řada schémat funkcí MAS. Pro současná i nově navržená schémata by měl existovat nástroj, který umožní simulaci jejich chování během provozu. Postulované modely musí mít svou architekturu přizpůsobenou požadavkům studia **chování MAS** ve vrstvách komunikace a implementace různých funkcionalit a povelů. V rámci MAS může být uvažováno o zavedení nadstavbových prvků a funkcí majících za úkol zvýšení spolehlivosti a efektivity fungování elektroenergetického systému.

Možnosti MAS s ohledem na ostrovní provozy sama o sobě přináší možnost, jak konfigurovat a určovat chování MAS v případě vymezení a vzniku ostrova. Postulované modely agentů by měly mít rozhraní přizpůsobené možným studiím chování algoritmů pro vymezování a přechody do a z OP.

8.5 Obecně požadované vlastnosti a funkce

Je zřejmé, že mimo zmíněné požadavky na funkcionality prvků ES by bylo vhodné zajistit také robustnost konkrétních modelů s ohledem na události a přechodné jevy, které mohou v sítích nastat. Postulované modely musí mít schopnost reagovat na požadavky nadřazených řídicích systému v rámci **komunikace** s dispečinkem, ostatními prvky, vloženými řídicími systémy nebo v rámci MAS. Stejně tak by měly modely obsahovat **elektrické ochrany** pro možnost studia vlivu a chování systému během různých poruch. Samozřejmostí je pak schopnost **synchronizace** zdroje se sítí, do níž je vyveden jeho výkon.

Tématem, kterým je do velké míry provázáno vše, co je uvedeno v této kapitole, je řízení VM. Postulované modely musí mít takovou strukturu, do níž bude snadné implementovat i jiné algoritmy řízení – pro možnost posuzování jejich vlivů při jejich různém nastavení na funkci jimi řízených zdrojů.

9 POŽADOVANÉ MODELÝ (CHARAKTERISTIKA A VLASTNOSTI)

Možností, jak přistoupit k řešení výzev uvedených v předchozí kapitole, je celá řada. Postupným vývojem úvah a pilotních funkčních modelů na základě požadovaných funkcí byla vytvořena finální architektura modelů prvků ES. Na začátku bylo nutné vzít do úvahy některá fakta a uvažovat o jejich návaznostech na budoucí modely. Cíle, které byly stanoveny v předchozí kapitole bylo nutné dále rozvést a **uvážít šíři a hloubku** naplnění požadavků. **Šíře** v kontextu této kapitoly, která má za cíl definovat hlavní strukturu a funkcionalitu modelů, reprezentuje šíři možností jednotlivých funkcí, které budou výsledné modely obsahovat. Šíře se váže k popisu v kapitolách 3, 4 a 5. **Hloubka** pak reprezentuje podrobnost a přesnost jednotlivých funkcionalit modelů. Hloubka se váže k popisu v kapitole 6. Tyto dva rozměry jsou do vysoké míry provázané.

Jedna z otázek, která se prolíná celým řešením, je požadavek na robustnost knihovny prvků, potažmo konkrétních modelů. V reálných sítích se vyskytuje velké množství prvků. Toto množství není možné vytvořit modelově kompletně v rámci práce malé skupiny lidí, kteří by se na tvorbě modelů podílely. Proto je nutné tento nadlidský úkol uvážene redukovat a zvolit takovou strukturu modelů, která bude uspokojivě pokrývat určitou šíři funkcionalit reálných systémů. Příkladem rozmanitosti reálných systémů může být úvaha nad množstvím typů zdrojů, které se vyskytují v reálných sítích a jejich systémem řízení, který může být velmi různý v závislosti např. na typu zdroje, podmínkách provozu, nastavení, požadavcích provozovatele zdroje či soustavy, vlastního know-how dodavatele systému řízení, ale i legislativě a ceně. Problematika popsána v tomto odstavci má vazbu na rozměr **šíře** modelů.

Další z otázek, která se prolíná celým řešením, je vazba mezi počítačovou simulací a fungováním reálného systému. Je zřejmé, že proměnné vstupující do procesu simulace elektromagnetického děje jsou jasně definovány a stejně tak je přesně definován i postup a výsledek výpočtu. U reálných systémů tomu tak úplně není. Do reálných procesů vstupují stochastické proměnné, které do určité míry ovlivňují chování systému. Řeč může být nejen o elektromagnetických dějích, ale i o parametrech, které ovlivňují vlastnosti komponent tvořící funkční elektroenergetický systém jako např. teplota, tlak, vlhkost atd. V současné době neexistuje softwarový nástroj, který by dokázal plně simulovat fungování reálného systému. Naštěstí, požadavek na zcela přesnou interpretaci reálné funkce není zdaleka tím nejhlavnějším požadavkem na modelované prvky. Při softwarových simulacích jde vždy o jakési přiblížení se reálnému stavu. Přesnost výpočtu zpravidla ovlivňuje složitost a čas výpočtu. Navíc není pravidlem, že podrobnějším modelem lze dosáhnout přesnějších výsledků, neboť interakce mezi složitými prvky může ukrývat výpočetní vazbu, která diverguje od celkově správného řešení. Problematika popsána v tomto odstavci má vazbu na rozměr **hloubky** modelů.

V této kapitole jsou popsány požadavky na modely a jejich jednotlivé moduly – je zde popsána potřebná šíře. Hloubka, tj. jak podrobně jsou moduly sestaveny, je popsána v rámci samotného popisu modelu (modulů).

Modely

K naplnění cílů uvedených v předchozí kapitole bylo nutné zvážit, které prvky sítí je nutné obecně vytvořit. Je zřejmé, že stěžejní pro celou práci jsou **modely zdrojů** a **modely agentů**. Mimo tyto bylo nutné uvažovat o dalších prvcích, které standartně nejsou součástí základní knihovny prvků programu PSCAD v takové hloubce, aby se daly jednoduše a bez úprav použít. Pro obecné

simulace sítě je výhodné nahrazovat část ES, která není předmětem zkoumání prvkem síťového napaječe, který však musí splňovat určité nastavitelné požadavky – musí existovat **model sítě**, který dokáže simulovat chování vnější sítě. Modely prvků sítě vytvořené v rámci této práce jsou koncipovány pro širší použití v případě dalšího studia problematiky provozu a řízení sítě.

S ohledem nejen na případnou složitost, ale i přehlednost a možnost a snadnost implementace různých funkcionalit bylo rozhodnuto o modulární architektuře modelů. Konkrétní model se tak skládá z několika modulů, které vždy zajišťují určitou funkci. Pro každý modul jsou definovány konkrétní vstupy a výstupy – analogové (reálné), logické (0, 1) či celočíselné (integer) proměnné a dále samotné algoritmy jejich funkcí. Každý modul má přesně definované funkce a přesně vymezené hranice s ostatními moduly. Modulové pojetí má výhodu nejen v přehlednosti, ale i při případné další úpravě určité části algoritmu funkce uživatelem. To umožňuje snadnější rozvoj dalších funkcionalit modelů při zachování přehlednosti. V následujících podkapitolách je popsána volba a požadavky na jednotlivé moduly modelů.

Veliká výhoda modulárnosti modelů vzhledem ke složitosti simulace, která se projeví především rychlostí běhu simulace (výpočtu), je možnost nahrazení nepotřebného modulu, tedy určité sady funkcí, tzv. výplňovým modulem. Výplňové moduly jsou vždy popsány v příslušných kapitolách konkrétního modelu. Filozofie, význam a teoretické příklady použití výplňových modulů je podrobněji vysvětleno v kapitole 10.1.13, která popisuje výplňové moduly modelu zdroje. Příkladem motivace pro využití výplňového modulu může být například studie, která nezkoumá funkci ochran zdroje, nýbrž pracuje např. pouze s jednoduchou analýzou toků výkonu nebo harmonickou analýzou. Při takových studiích je použití plného modulu ochran nežádoucí z důvodu jeho náročnosti na výpočetní výkon a logicky obecně zbytečnosti jeho použití.

Volba architektury modelů

Filozofie struktury modelů byla zvolena s ohledem na několik myšlenek. První myšlenkou je skutečná struktura reálných prvků v síti. Pro příklad lze uvést popis možného chápání struktury obecné výrobní elektrické energie. Elektrárnu lze rozdělit na několik částí, které samy o sobě nejsou schopny plnit požadavek, který na elektrárnu existuje – dodávka elektrické energie do sítě. Požadavku dodávky elektrické energie do sítě je dosaženo přeměnou primární energie na energii elektrickou, často s mezičlánky, jako jsou výroba tepla, rotační pohyb hřídele rotoru generátoru atd. Tato hlavní výrobní osa je vždy doplněna dalšími systémy, které zajišťují to, že vyrobená energie bude nejen a pouze předána v podobě elektrické energie, ale i vyrobena a dodána v určitém množství, o požadovaných parametrech – v požadované kvalitě. To obecně zajišťuje prvek řízení. Řízení samo o sobě však ke své správné požadované funkci potřebuje určité informace z technologie. Jde o měření různých parametrů, ať už elektrických nebo neelektrických veličin, na jejichž základě jsou řízeny další akční členy s cílem dosáhnout požadovaného cíle. Nedílnou součástí elektrárny je pak systém ochrany, který má nejčastěji za úkol chránit samotnou technologii výroby. Takový systém elektrárny lze dále rozšířit o možnosti komunikace s dalšími prvky sítě, za které můžeme považovat dispečink provozovatele sítě, další elektrárny a jiné prvky v síti.

Druhou myšlenkou jsou různé možnosti přístupu k modelování prvků sítě. Myšlenku lze opět vysvětlit na příkladu obecné elektrárny, kterou můžeme v závislosti na požadavcích simulace modelovat různými způsoby. Chceme-li například zkoumat pouze toky výkonů, lze použít pouze přibližný model (average model), který je principem své funkce jednoduchý z pohledu modelování a zajišťuje dostatečně přesnou interpretaci požadované funkce elektrárny při některých typech simulací. Chceme-li ale zkoumat například vliv harmonických složek napětí a proudů, jiné dynamické vlastnosti nebo vlastnosti měničů, je nutné použít složitější model (full model, real

switching model). Podobně stejně tak další návaznosti systému se můžou lišit v závislosti na požadovaném výstupu simulace.

Třetí myšlenou je komplexnost systému v případě, jestliže má mít model kteréhokoliv prvku sítě vysoký stupeň využití, jestliže má být univerzální, a přesto snadno uživatelsky nastavitelný a srozumitelný. S touto myšlenkou lze uplatnit takový přístup, že například pouze různým nastavením jednoho modelu agenta lze dosáhnout vytvoření různého typu agenta s různými funkcionalitami v rámci sítě.

Všechny myšlenky vedly k tomu, že je vhodné rozdělit celkový model zdroje i agenta do několika modulů. Každý modul zajišťuje dílčí část celkové funkce. Následující popisné podkapitoly jsou dále děleny právě s ohledem na zvolené rozdělení modelů na moduly. Celkový konkrétní model tak získává na přehlednosti a stává se uživatelsky snadněji použitelným. Navíc je takto možné nahradit pouze dílčí část modelu jiným druhem, který lépe odpovídá požadavkům simulace (např. average nebo full model), nebo který reprezentuje jiný skutečný prvek stejného typu (např. druh elektrárny, typ agenta).

Vlastnosti vs. funkce

Konkrétní požadavky na VM lze pomyslně rozdělit do dvou skupin. První skupinou jsou požadavky, které jsou pomyslně vázány ke konstrukčním vlastnostem zdroje. V jistém slova smyslu jde o robustnost zdroje z pohledu návrhu a konstrukce jednotlivých komponent. Druhou skupinu tvoří požadavky, jejichž naplnění lze dosáhnout vhodnou realizací řídicích algoritmů v rámci řízení zdroje. Obě skupiny jsou do jisté míry provázány a nebylo by účinné jednotlivé požadavky na VM takto striktně dělit. Je však nutné si uvědomit, že realizace požadovaných vlastností VM je dosaženo jak v oblasti konstrukce – fyzických *vlastností* komponent, tak v oblasti řízení – řídicích *funkcí*. Zde shledávám obrovskou výhodu možností simulačního prostředí, neboť jak vlastnosti, tak funkce lze různě nastavovat a lze tak simulovat chování VM během různých (opět nastavitelných) situací/stavů.

S ohledem na modely zdroje je nutné s touto myšlenkou pracovat a být si ji vědom při realizaci každé funkce zdroje – do jaké míry se jedná o vlastnost konkrétního typu zdroje a do jaké míry se jedná v podstatě o požadavek na řízení.

Globální restrikce

Obecně, modelování a simulace reálných systémů se málokdy obejdou bez určitých zjednodušení, zanedbání. Pro studium chování reálných elektroenergetických systému obecně neexistuje nástroj, který by dokázal provoz simulovat 100% správně – podle skutečnosti. Mnoho minoritních vlivů a detailů, které ovlivňují provoz lze do simulací implementovat, nicméně musí existovat úvaha o tom, zda je jejich zahrnutí nutné a žádoucí a jestli a jak ovlivní výsledky výpočtů. Řeč může být v největším detailu o vlivu neelektrických parametrů jako teplota, tlak a vlhkost – obecně počasí, stav prostředí. Tyto vlivy v modelech zakomponovány nejsou.

Vzhledem ke složitosti celé problematiky fungování reálných sítí jsou v této práci záměrně opomenuty dále některé skutečnosti. Je například počítáno se 100% spolehlivostí fungování všech prvků/komponent. Časové zpoždění interní komunikace v rámci modelu je zanedbáno s odkazem na neurčitost a rozmanitost různých provedení systémů různých výrobců digitalizovaných systémů.

V rámci ochranných funkcí zdrojů je uvažováno pouze s ochranami, které mají návaznost na elektrickou část zdroje či agenta. Technologické ochrany v modelech nejsou zahrnuty. Dále nejsou

implementovány všechny typy ochran, neboť práce se ochranami přímo nezabývá. Pro většinu studií zaměřujících se na provoz zdrojů a sítí se dá vystačit se základními typy ochran.

Tyto nedostatky neubírají na kvalitě výsledků simulací a zároveň do určité míry zjednodušují popis problému a zkracují nutnou výpočetní dobu provedených simulací.

9.1 Požadavky na model zdroje

Na základě předchozích kapitol této práce lze definovat řadu požadavků na model zdroje. Některé požadované vlastnosti tak, jak jsou uvedeny v této podkapitole, vznikají na základě potřeby zajistit signály či data jiným funkčním celkům (například funkce měření), jiné na základě požadavku robustnosti a možné použitelnosti modelu. Požadované a nutné vlastnosti – funkce, jsou uvedeny v tab. 9-1. Funkce jsou pro přehlednost nejen popisu, ale i struktur modelů označeny symbolem ***F*** (jako funkce) a pořadovým dvojčíslem. Toto označení se vyskytuje nejen v následujícím popisu architektury zdroje, ale také v samotných modulech v programu PSCAD. Každá funkce má také jasně určený modul, ve kterém je implementována, a ve kterém se uplatňuje. Existují samozřejmě i funkce, které lze použít u více nebo všech typů zdrojů. Stejně tak existují funkce, které lze použít jak v modelech zdrojů, tak modelech agentů (např. jednotlivé funkce v modulech měření). Popis konkrétních modelů a modulů je uveden v další podkapitole. Konečná volba a rozsah funkcí byl vytvořen s ohledem na požadavky na zdroje uvedené v kapitole 3.1 a obecné nutné vlastnosti zdrojů a úvahou nad požadovanou použitelností modelů. Speciálně, funkce zajišťující měření nebo určení/výpočtu určitého parametru jsou označeny symbolem ***M***, funkce zajišťující ochrannou funkci jsou označeny symbolem ***O***. Rozdělením modelu na funkční bloky lze také snadněji definovat jednotlivé funkce – definovat vstupy → algoritmus → výstupy.

Je zřejmé, a bylo to zmíněno již dříve v textu, že některé studie nevyužijí všechny postulované funkce modelu. Nicméně pokud jsou i nepotřebné funkce v modelu zahrnuty, tak ač je jejich funkce v nastavení příslušného modulu zakázána (či jiným modulem nebo funkcí vyblokována), tak i přesto dochází k zahrnutí algoritmu do výpočtu celé simulace. To přináší zvýšenou výpočetní náročnost a tím nežádoucí delší průběh simulace. Proto bylo přistoupeno k následujícímu řešení. Všechny funkce byly rozděleny na tzv. **pevné**, **zrušitelné** a **blokovatelné**. Pevné funkce nelze z příslušného modulu v žádném případě odstranit. Došlo by ke ztrátě základní funkce a model by buď nefungoval správně nebo vůbec. Takovými funkcemi jsou např. měření, samotné řízení v základním výkonovém módu atd. Jinak tomu je u ostatních kategorií. Do kategorie zrušitelných funkcí jsou zařazeny ty, které se v určitých studiích mohou vynechat a jsou to zároveň ty, pro které existuje výplňový modul. Použití výplňového modulu při vyřazení zrušitelné funkce však není mandatorní. Zrušitelnou funkci lze totiž blokovat/zakázat přímo v rámci nastavení modulu, ve kterém je umístěn. Do kategorie blokovatelných funkcí jsou zařazeny ty, které lze v nastavení modulu, ve kterém jsou umístěny, blokovat/vyřadit z jejich návazností. Pro tyto funkce neexistuje přímo výplňový modul. Modely jsou však topologicky vytvořeny/uzpůsobeny tak, aby uživatel mohl v případě potřeby z příslušného modulu blokovatelnou funkci úplně odstranit a přispět tak k urychlení výpočtu. Zrušitelnost blokovatelné funkce je vždy uvedena v rámci popisu dané funkce. Jedná se vesměs o informaci o nastavení výstupů dané funkce tak, aby v návaznostech nebyla uplatňována. Filozofie procesu zrušitelnosti blokovatelných funkcí, a především obecný popis výplňových modulů je uveden v kapitole 10.1.13.

Model uvedený ve sloupci *model/modul* tab. 9-1 odkazuje na typ modelu zdroje, který je popsán v prvním odstavci kapitoly 10.1 (strana 162) a uvádí model, ve kterém je daná funkce použita. Název modulu v tomtéž sloupci odpovídá značení modulu v knihovně prvků

(*Library_SG.pslx*) v programu PSCAD, která je přílohou této práce a kde jsou seskupeny všechny modely a moduly vzniklé v rámci této práce. Vyskytují se tam moduly samotného zdroje (*DG_main_U*, *DG_main_IBG*, *DG_main_SG*), měření (*DG_meas*), komunikace (*DG_com*), řízení (*DG_ctrl_IBG_MS*, *DG_ctrl_SG_MS*), ochran (*DG_prot*) a synchronizace (*DG_sync*). Vlastní popis funkcí je uveden v kapitole 9.1.5 (od strany 144).

tab. 9-1: Rozčlenění vlastností modelu zdroje

označení funkce	název funkce	pevný / zrušitelný / blokovatelný	model / modul
M01	Určení frekvence	pevný	U / DG_meas IBG / DG_meas SG / DG_meas
M02	Určení činného a jalového výkonu a účinníku	pevný	U / DG_meas IBG / DG_meas SG / DG_meas
M03	Určení efektivní hodnoty sdruženého napětí	pevný	U / DG_meas IBG / DG_meas SG / DG_meas
M04	Určení fázového posuvu napětí	pevný	U / DG_meas IBG / DG_meas SG / DG_meas
M05	Určení napětí a proudu v dq souřadnicovém systému	pevný	U / DG_meas IBG / DG_meas SG / DG_meas
F01	Zpracování nominálního a požadovaného výkonu	pevný	U / DG_ctrl_IBG_MS IBG / DG_ctrl_IBG_MS SG / DG_ctrl_SG_MS
F02	Výběr a rampa činného a jalového výkonu pro řízení	pevný	U / DG_ctrl_IBG_MS IBG / DG_ctrl_IBG_MS SG / DG_ctrl_SG_MS
F03	Určení regulačního módu	pevný	U / DG_ctrl_IBG_MS IBG / DG_ctrl_IBG_MS SG / DG_ctrl_SG_MS
F04	Regulační obvod řízení IBG - slave	pevný	U / DG_ctrl_IBG_MS IBG / DG_ctrl_IBG_MS
F05	Regulační obvod řízení IBG - master – obvod napětí	pevný	U / DG_ctrl_IBG_MS IBG / DG_ctrl_IBG_MS
F06	Regulační obvod řízení IBG - master – obvod frekvence	pevný	U / DG_ctrl_IBG_MS IBG / DG_ctrl_IBG_MS
F07	Regulační obvod řízení SG	pevný	SG / DG_ctrl_SG_MS
F08	Určení parametrů regulačního obvodu v závislosti na regulačním módu pro IBG	pevný	U / DG_ctrl_IBG_MS IBG / DG_ctrl_IBG_MS
F09	Určení parametrů regulačního obvodu v závislosti na regulačním módu pro SG	pevný	SG / DG_ctrl_SG_MS
F10	Generování požadovaného napětí střídače	pevný	U / DG_ctrl_IBG_MS IBG / DG_ctrl_IBG_MS
F11	Frekvenčně závislý režim ($P=f(f)$)	blokovatelný	U / DG_ctrl_IBG_MS IBG / DG_ctrl_IBG_MS SG / DG_ctrl_SG_MS

F12	Odezva v omezeném frekvenčně závislém režimu při podfrekvenci ($P=f(f_-)$)	blokovatelný	U / DG_ctrl_IBG_MS IBG / DG_ctrl_IBG_MS SG / DG_ctrl_SG_MS
F13	Odezva v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci ($P=f(f_+)$)	blokovatelný	U / DG_ctrl_IBG_MS IBG / DG_ctrl_IBG_MS SG / DG_ctrl_SG_MS
F14	Snížení činného výkonu závisle na napětí ($P(U)$)	blokovatelný	U / DG_ctrl_IBG_MS IBG / DG_ctrl_IBG_MS SG / DG_ctrl_SG_MS
F15	Řízení jalového výkonu v závislosti na činném výkonu	blokovatelný	U / DG_ctrl_IBG_MS IBG / DG_ctrl_IBG_MS SG / DG_ctrl_SG_MS
F16	Řízení jalového výkonu v závislosti na napětí	blokovatelný	U / DG_ctrl_IBG_MS IBG / DG_ctrl_IBG_MS SG / DG_ctrl_SG_MS
F17	Rychlý poruchový proud	blokovatelný	U / DG_ctrl_IBG_MS IBG / DG_ctrl_IBG_MS SG / DG_ctrl_SG_MS
F18	Umělá setrvačnost	blokovatelný	U / DG_ctrl_IBG_MS IBG / DG_ctrl_IBG_MS SG / DG_ctrl_SG_MS
F19	Ověření splnění fázovacích podmínek	pevný	U / DG_sync IBG / DG_sync SG / DG_sync
F20	Synchronizace a resynchronizace	pevný	U / DG_sync IBG / DG_sync SG / DG_sync
F21	Vnější komunikace modelu zdroje	blokovatelný / zrušitelný	U / DG_com IBG / DG_com SG / DG_com
F22	Výstup modulu ochran VM	pevný	U / DG_prot IBG / DG_prot SG / DG_prot
O01	Podpěťové relé	blokovatelný / zrušitelný	U / DG_prot IBG / DG_prot SG / DG_prot
O02	Nadpěťové relé	blokovatelný / zrušitelný	U / DG_prot IBG / DG_prot SG / DG_prot
O03	Podfrekvenční relé	blokovatelný / zrušitelný	U / DG_prot IBG / DG_prot SG / DG_prot
O04	Nadfrekvenční relé	blokovatelný / zrušitelný	U / DG_prot IBG / DG_prot SG / DG_prot
O05	RoCoF	blokovatelný / zrušitelný	U / DG_prot IBG / DG_prot SG / DG_prot

9.1.1 Simulace souladu podle RfG

S ohledem na možnosti provádění simulací namísto fyzických testů některých vlastností VM požadovaných RfG, je nutné tyto funkce zahrnout do modelů zdrojů. Zkoušky souladu podle RfG jsou popsány v kapitole 3.1.2 (od strany 71). V následujících odstavcích této podkapitoly je uveden popis funkcí, které mohou být testovány simulací, spolu krátkým popisem odkazujícím vesměs na provázání kapitoly 3.1.2 (kde jsou jednotlivé možné simulace popsány) a kapitoly 9.1.5 (kde jsou popsány konkrétní funkce modelu).

Konkrétní odkaz na funkci v modelu zdroje potřebnou pro daný typ simulace nesmí být vnímán bez kontextu k dalším návaznostem modelu! Požadavky na VM je nutné vnímat komplexně skrze celý systém fungování zdroje. Vždy se jedná o návaznost prostupující více částmi modelu. Všechny vlastnosti zdroje, které mají být dle RfG a dalších předpisů testovány je nutné správně integrovat do vlastností modelu zdroje tak, aby co nejvíce odpovídaly realitě fyzické konstrukce, měření, řízení a ochranám skutečného zdroje.

Odezva v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci

Pro možnost provádění simulace odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci dle RfG čl. 51.2 (pro SVM) a RfG čl. 54.2 (pro NVM) (viz tab. 3-4 v kapitole 3.1.2) tak, jak je uvedeno v kapitole 3.1.2 (Simulace odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci (SVM B, C, D) a Simulace odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci (NVM B, C, D)) je nutné v modelu zdroje použít funkce F13 – Odezva v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci s návazností na funkci F04 – Regulační obvod řízení IBG - slave nebo F07 – Regulační obvod řízení SG uvedené v kapitole 9.1.5.

Odezva v omezeném frekvenčně závislém režimu při podfrekvenci

Pro možnost provádění simulace odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při podfrekvenci dle RfG čl. 52.2 (pro SVM) a RfG čl. 55.2 (pro NVM) tak, jak je uvedeno v kapitole 3.1.2 (Simulace odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při podfrekvenci (SVM C, D) a Simulace odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při podfrekvenci (NVM C, D)) je nutné v modelu zdroje použít funkce F12 – Odezva v omezeném frekvenčně závislém režimu při podfrekvenci s návazností na funkci F04 – Regulační obvod řízení IBG - slave nebo F07 – Regulační obvod řízení SG uvedené v kapitole 9.1.5.

Odezva ve frekvenčně závislém režimu

Pro možnost provádění simulace odezvy ve frekvenčně závislém režimu dle RfG čl. 52.3 (pro SVM) a RfG čl. 55.3 (pro NVM) tak, jak je uvedeno v kapitole 3.1.2 (Simulace odezvy ve frekvenčně závislém režimu (SVM C, D) a Simulace odezvy ve frekvenčně závislém režimu (NVM C, D)) je nutné v modelu zdroje použít funkce F11 – Frekvenčně závislý režim s návazností na funkci F04 – Regulační obvod řízení IBG - slave nebo F07 – Regulační obvod řízení SG uvedené v kapitole 9.1.5.

Schopnost dodávat jalový výkon

Pro možnost provádění simulace schopnosti dodávat jalový výkon dle RfG čl. 52.5 (pro SVM) a RfG čl. 55.6 (pro NVM) tak, jak je uvedeno v kapitole 3.1.2 (Simulace schopnosti dodávat jalový výkon (SVM C, D) a Simulace schopnosti dodávat jalový výkon (NVM C, D)) je nutné v modelu zdroje použít funkce F15 a F16 – Způsoby řízení jalového výkonu a funkci F04 – Regulační obvod řízení IBG - slave nebo F07 – Regulační obvod řízení SG.

Překlenutí poruchy

Pro možnost provádění simulace schopnosti překlenutí poruchy dle RfG čl. 51.3 (pro SVM B a C), RfG čl. 53.3 (pro SVM D), RfG 54.4 (pro NVM B a C) a RfG čl. 56.3 (pro NVM D) tak, jak je uvedeno v kapitole 3.1.2 (Simulace schopnosti překlenout poruchu (SVM B, C), Simulace schopnosti překlenout poruchu (SVM D), Simulace schopnosti překlenout poruchu (NVM B, C) a Simulace schopnosti překlenutí poruchy (NVM D)) je nutné v modelu zdroje správně interpretovat reálné chování zdroje spolu se správným nastavením řídicích a ochranných funkcí. Požadavek pro možnost simulace souladu s ohledem na schopnost překlenutí poruchy se tak prolíná možnostmi nastavením *řídicích* a *ochranných* funkcí spolu s požadavkem na správnou interpretaci fyzického chování zdroje, které řeší modul *samotného zdroje*.

Obnovení činného výkonu po poruše

Pro možnost provádění simulace obnovení činného výkonu po poruše dle RfG čl. 51.4 (pro SVM) a RfG čl. 54.5 (pro NVM) tak, jak je uvedeno v kapitole 3.1.2 (Simulace obnovení činného výkonu po poruše (SVM B, C, D) a Simulace obnovení činného výkonu po poruše (NVM B, C, D)) je nutné v modelu zdroje opět správně interpretovat reálné chování zdroje spolu se správným nastavením řídicích a ochranných funkcí. Požadavek pro možnost simulace souladu s ohledem na schopnost obnovení činného výkonu po poruše se tak prolíná možnostmi nastavením *řídicích* a *ochranných* funkcí spolu s požadavkem na správnou interpretaci fyzického chování zdroje, které řeší modul *samotného zdroje*.

Ostrovní provoz

Pro možnost provádění simulace ostrovního provozu dle RfG čl. 52.4 (pro SVM) a RfG čl. 55.4 (pro NVM) tak, jak je uvedeno v kapitole 3.1.2 (Simulace ostrovního provozu (SVM C, D) a Simulace ostrovního provozu (NVM C, D)) je nutné v modelu zdroje použít funkce F11 – Frekvenčně závislý režim, F12 – Odezva v omezeném frekvenčně závislém režimu při podfrekvenci a F13 – Odezva v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci s návazností na funkci F04 – Regulační obvod řízení IBG - slave nebo F07 – Regulační obvod řízení SG, uvedené v kapitole 9.1.5 a další na ní navazující funkce.

Tlumení výkonových oscilací

Pro možnost provádění simulace regulace tlumení výkonových oscilací dle RfG čl. 53.2 (pro SVM) a RfG čl. 55.7 (pro NVM) tak, jak je uvedeno v kapitole 3.1.2 (Simulace regulace tlumení výkonových oscilací (SVM D) a Simulace regulace tlumení výkonových oscilací (NVM C, D)) je nutné mít možnost u modelu SVM použít modul systémového stabilizátoru (PSS – Power System Stabilizer) a v modelu zdroje použít možnost nastavit závislosti regulací činného výkonu a frekvence v rámci funkce F11 – Frekvenčně závislý režim uvedenou v kapitole 9.1.5.

Dodávky rychlého poruchového proudu

Pro možnost provádění simulace dodávky rychlého poruchového proudu dle RfG čl. 54.3 (pro NVM) tak, jak je uvedeno v kapitole 3.1.2 (Simulace dodávky rychlého poruchového proudu (NVM B, C, D)) je nutné v modelu zdroje použít funkci F17 – Rychlý poruchový proud, uvedenou v kapitole 9.1.5.

Schopnosti zajišťovat umělou setrvačnost

Pro možnost provádění simulace schopnosti zajišťovat umělou setrvačnost dle RfG čl. 55.5 (pro NVM) tak, jak je uvedeno v kapitole 3.1.2 (Simulace schopnosti zajišťovat umělou setrvačnost

(NVM C, D)) je nutné v modelu zdroje použít funkci F18 – Umělá setrvačnost uvedenou v kapitole 9.1.5.

9.1.2 Výkonové charakteristiky

Mezi výkonové charakteristiky lze obecně zahrnout funkce, které mají vliv na požadovanou velikost činného nebo jalového výkonu v závislosti na jiném parametru. Zejména jde o vztah mezi veličinami činného výkonu, jalového výkonu, napětí a frekvence. Z tohoto pohledu lze, samozřejmě s ohledem na požadavky RfG, PPDS a dalších, rozdělit schopnost zdroje na několik závislostí/funkcí, které je nutné určitým způsobem aplikovat. Na základě popisu podkapitolách kapitoly 3.3 lze jako požadavek na modely VM definovat regulace popsané v následujících podkapitolách.

Pro **činný výkon** v podstatě existuje požadavek na jeho regulaci v závislosti na jeho požadované hodnotě nebo v závislosti na frekvenci nebo v závislosti na napětí v místě připojení, popřípadě jinde v síti. Pro **jalový výkon** v podstatě existuje požadavek na jeho regulaci v závislosti na jeho požadované hodnotě nebo v závislosti na velikosti činného výkonu zdroje nebo v závislosti na napětí v místě připojení, popřípadě jinde v síti.

Regulace činného a jalového výkonu v závislosti na požadavku

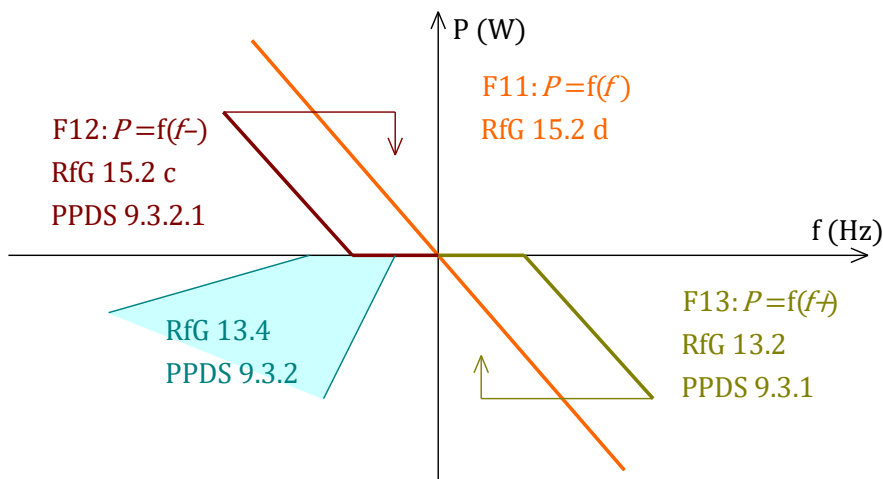
Tento požadavek na regulaci velikosti činného a jalového výkonu se dá uvést jako základní. Požadavek na velikost činného výkonu je povětšinou spjat výkonem zdroje primární energie a tato regulace má zpravidla přímou návaznost do regulací v rámci strojní technologie VM. Hodnotu požadovaného činného výkonu je také nutné chápat jako důsledek smluvních podmínek pro provoz zdroje mezi provozovatelem VM a provozovatelem soustavy, do níž je zdroj připojen. V rámci modelu je nutné tento požadavek chápat a aplikovat jako možnost zadávat požadovaný činný výkon VM uživatelem, který tak pro dané simulace imituje buď funkci primárního zdroje energie nebo funkci provozovatele soustavy.

Požadavek na velikost jalového výkonu je povětšinou spjat s požadavkem provozovatele soustavy, resp. jeho požadavku na velikost jalového výkonu v závislosti na stavu sítě z pohledu napěťových poměrů. Tento požadavek může být neměnný v rámci provozu VM nebo se může měnit na požádání/povel provozovatele soustavy. V rámci modelu je nutné tento požadavek chápat a aplikovat jako možnost zadávat požadovaný jalový výkon VM uživatelem, který tak pro dané simulace imituje požadavky dispečera. Požadavek se dá chápat i jako možnost nastavení fixní hodnoty jalového výkonu (Q_{fix}).

Možnost zadání požadovaného činného výkonu je v modelu VM řešena v rámci funkce F01 a F02 – Řízení činného výkonu v závislosti na provozních podmínkách (konkrétně ve funkci F01 – Nominální a požadovaný P). Možnost zadání požadované hodnoty jalového výkonu je v modelu VM řešena v rámci funkce F15 a F16 – Způsoby řízení jalového výkonu (konkrétně ve funkci F15 – $Q = f(P)$, kde se dá nastavit právě volba Q_{fix}).

Regulace činného výkonu v závislosti na frekvenci

V podstatě existuje několik možností, jak lze po VM vyžadovat změnu činného výkonu v závislosti na změně frekvence. V rámci předpisů (RfG, PPDS) jsou závislosti popsány s vazbou na okamžitou hodnotu frekvence či její odchylku od nominální hodnoty. To do jisté míry problematiku zjednodušuje (- není požadavek na regulaci činného výkonu v závislosti na rychlosti změny / gradientu frekvence, který přináší až funkce umělé setrvačnosti). Problematiku zjednodušeně naznačuje obr. 9-1.



obr. 9-1: Ilustrace možností regulace činného výkonu v závislosti na frekvenci

V ilustraci je naznačen i požadavek na robustnost VM na základě požadavků PPDS kapitoly 9.3.2 (viz stranu 64), resp. RfG čl. 13.4, který je kladen na VM nedisponující schopností regulací činného výkonu při podfrekvenci. Funkce $P = f(f)$ je v podstatě funkce suplující primární regulaci činného výkonu a frekvence. To, v rámci filozofie provedení modelů zdrojů, zapadá do regulací v rámci módu master (- módy jsou popsány v rámci funkce F03 – Určení regulačního módu v kapitole 9.1.5). Samotná funkce $P = f(f)$ je v modelu zdroje zakomponována jako funkce F11 – Frekvenčně závislý režim. Funkce $P = f(f+)$, resp. $P = f(f-)$ jsou funkce odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci, resp. podfrekvenci. V modelech zdroje jsou tyto funkce zakomponovány jako volitelné funkce F12 – Odezva v omezeném frekvenčně závislém režimu při podfrekvenci, resp. F13 – Odezva v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci.

Regulace činného výkonu v závislosti na napětí

Požadovaná vlastnost modelu VM je schopnost regulace činného výkonu podle velikosti napětí v místě připojení zdroje k síti. S ohledem na možnosti provozu moderních sítí byla v rámci této regulace zahrnuta i možnost řízení požadovaného činného výkonu podle napětí jinde v síti – podle externího signálu reprezentujícího velikost napětí, jehož měření tak uživatel může umístit libovolně v síti.

Možnost tohoto typu regulace je v modelu zakomponována v rámci funkce F14 – Snížení činného výkonu závisle na napětí – funkce $P(U)$.

Regulace jalového výkonu v závislosti na činném výkonu

Tato regulace definuje funkci požadovaného jalového výkonu v závislosti na činném výkonu VM ($Q(P)$). Do rámce této regulace se dá kromě regulace $Q(P)$ zahrnout i schopnost VM udržovat pevnou hodnotu účinníku ($\cos\varphi$ fix), resp. poměr mezi činným a jalovým výkonem. Nejedná se v podstatě o nic jiného než přepočítání žádané hodnoty účinníku na velikost jalového výkonu podle současné velikosti činného výkonu. Podobně je tomu u regulace účinníku podle velikosti činného výkonu ($\cos\varphi(P)$), kdy opět dochází k přepočtu na požadovanou hodnotu jalového výkonu pro vstup regulátoru výkonu VM.

Možnost těchto typů regulací jsou v modelu zakomponovány v rámci funkce F15 a F16 – Způsoby řízení jalového výkonu (konkrétně ve funkci F15 – $Q = f(P)$).

Regulace jalového výkonu v závislosti na napětí

Regulace jalového výkonu v závislosti na velikosti napětí ($Q(U)$) může být opět řešena na základě napětí v místě připojení nebo na základě externího signálu (stejně jako u regulace $P(U)$). Regulace účinníku v závislosti na velikosti napětí ($\cos\varphi(U)$) také spadá do rámce regulace jalového výkonu podle napětí. Opět jde pouze o přepočet žádané hodnoty jalového výkonu podle závislosti požadovaného účinníku při různém napětí.

Možnost těchto typů regulací jsou v modelu zakomponovány v rámci funkce F15 a F16 – Způsoby řízení jalového výkonu (konkrétně ve funkci F16 – $Q = f(U)$).

9.1.3 Ochrany

Je nutné si uvědomit, že práce není primárně zaměřena na funkce ochrany, ale na funkce řídicí a regulační. Nicméně problematiku ochrany nelze zcela opomenout kvůli její vazbě na reálný provoz soustavy, resp. zdroje. Je nutné, v dostatečné míře, zahrnout určité typy ochrany do konceptu modelů. Shrnutím kapitol 2.2.2 a 3.4, které se zabývají popisem ochranných funkcí a požadavky na systémy chránění VM, a uvážením účelu postulovaných modelů, lze definovat konkrétní paletu ochranných funkcí, které by měly být v rámci modelu VM zahrnuty. S požadavky na funkci ochrany je také spjata problematika popsána v kapitolách o ostrovních provozech (kapitola 4) a multiagentních systémech (kapitola 5). V rámci modelu VM lze omezit množství funkcí na ty, které budou relevantní pro typy simulací, kterými se ve výsledku zabývá tato práce. S ohledem jednak na požadavky RfG a PPDS a jednak na obecné požadavky činnosti MAS a funkce ostrovních provozů je plně dostačující zahrnout základní formu přepětíové a podpětíové ochrany, nadfrekvenční a podfrekvenční ochrany a funkci typu RoCoF.

Co by mělo být v rámci uživatelského nastavení modulu ochrany umožněno je možnost určení typu povelu, který vyvolá vybavení ochrany. Překročení nastavených limitů dané ochranné funkce nemusí totiž vést přímo k povelu na odpojení VM od sítě, ale může vést ke změně regulačního módu (ze slave na master) prostřednictvím informace o inicializaci ostrovního provozu. V rámci moderních sítí by se dalo uvažovat mnoho různých důsledků, které by mohlo překročení limity určitého parametru způsobit v nastavení řízení/funkce zdroje, nicméně aplikace ať už jen uváženého množství různých zásahů ochranného modulu do funkce modulu řídicího by přinášelo nepoměrně zvýšenou výpočetní náročnost a složitost modelu v poměru k rozšířeným možnostem primárního účelu modelu VM. Jinými slovy, tato práce se primárně nezabývá studiem možností přizpůsobení zdroje situaci v síti v úrovni povolování či zakazování určitých funkcionalit řídicího systému VM v závislosti právě na stavu sítě (z pohledu změny napětí, frekvence, impedance, konfigurace topologie sítě atd.).

Z opačného pohledu, v závislosti na módu zdroje (master, slave) a stavu provozu (ostrovní, synchronní), je požadavek na možnost vyblokování konkrétní ochranné funkce či její jiné nastavení. To se obecně nevztahuje k funkci jako takové, ale funkci včetně stupně. To vedlo k aplikaci více stupňů ochrany, než je legislativou dáno a jejich vnímání je nutné chápat vzájemně odděleně, ve smyslu, že pomyslný stupeň je uživatelsky nastavitelný podle požadované funkce v rámci konkrétní simulace. Tím je umožněno uživateli nastavit ochrannou funkci podle svých představ tak, aby byla funkční s různým nastavením v různých módech zdroje a různých stavech sítě.

Takto požadovaná struktura vlastností a možností nastavení modulu ochrany je požadována s ohledem na spektrum zaměření studií realizovaných simulací.

Podpět'ové relé

Požadavky na možnosti nastavení funkce podpět'ového relé (ANSI 27) se vážou jednak k vyhodnocovanému napětí (sdružené nebo fázové), k možnosti časové prodlevy iniciace zásahu, typu zásahu (odpojení nebo přechod do ostrova), platnosti v konkrétním provozním režimu VM (master nebo slave), platnosti v konkrétním stavu sítě (synchronní provoz nebo ostrovní provoz) a také k možnosti funkci podpět'ového relé blokovat. Tyto obecné požadavky na model ochranné funkce, který vyhodnocuje pouze překročení nastavené úrovně hlídaného parametru se dá s výhodou použít i pro funkce napět'ového relé (ANSI 59), podfrekvenčního relé (ANSI 81U) a nadfrekvenčního relé (ANSI 81O). Je vhodné podotknout, že se od funkce podpět'ového relé primárně nepředpokládá, že by ochranný zásah realizoval přechod do ostrovního provozu, nicméně pro možnosti širšího portfolia možných simulací je tato možnost v nastavení modulu obsažena.

Dle popisu požadavků na funkci podpět'ové ochrany v kapitole 3.4 (strana 97) by pro tento typ ochrany měl existovat právě jeden stupeň nastavení. Nicméně vzhledem k možnostem nastavení platnosti ochranné funkce v různých stavech sítě (synchronní provoz, ostrovní provoz) a zároveň v různých provozních režimech VM (master, slave), byla zvolena možnost nastavení dvou stupňů tohoto typu ochrany.

Funkce je realizována v rámci funkce O01 – Podpět'ové relé, jejíž popis je uveden v příslušném odstavci kapitoly 9.1.5.

Nadpět'ové relé

Požadavky na možnosti nastavení funkce nadpět'ového relé (ANSI 59) jsou vesměs stejné jako u funkce podpět'ového relé (viz předchozí podkapitolu).

Dle popisu požadavků na funkci nadpět'ové ochrany v kapitole 3.4 by pro tento typ ochrany měly existovat právě tři stupně nastavení. Vzhledem k možnostem nastavení platnosti ochranné funkce v různých stavech sítě a různých provozních režimech VM, byla zvolena možnost nastavení čtyř stupňů tohoto typu ochrany.

Funkce je realizována v rámci funkce O02 – Nadpět'ové relé, jejíž popis je uveden v příslušném odstavci kapitoly 9.1.5.

Podfrekvenční relé

Požadavky na možnosti nastavení funkce podfrekvenčního relé (ANSI 81U) jsou vesměs stejné jako u funkce nadpět'ového relé (viz předchozí podkapitolu).

Dle popisu požadavků na funkci podfrekvenční ochrany v kapitole 3.4 by pro tento typ ochrany měl existovat právě jeden stupeň nastavení. Vzhledem k možnostem nastavení platnosti ochranné funkce v různých stavech sítě a různých provozních režimech VM, byla zvolena možnost nastavení dvou stupňů tohoto typu ochrany.

Funkce je realizována v rámci funkce O03 – Podfrekvenční relé, jejíž popis je uveden v příslušném odstavci kapitoly 9.1.5.

Nadfrekvenční relé

Požadavky na možnosti nastavení funkce nadfrekvenčního relé (ANSI 81O) jsou vesměs stejné jako u funkce podfrekvenčního relé (viz předchozí podkapitolu).

Dle popisu požadavků na funkci nadfrekvenční ochrany v kapitole 3.4 by pro tento typ ochrany měl existovat právě jeden stupeň nastavení. Vzhledem k možnostem nastavení platnosti ochranné

funkce v různých stavech sítě a různých provozních režimech VM, byla zvolena možnost nastavení dvou stupňů tohoto typu ochrany.

Funkce je realizována v rámci funkce O04 – Nadvysokofrekvenční relé, jejíž popis je uveden v příslušném odstavci kapitoly 9.1.5.

RoCoF relé

Požadavky na možnosti nastavení ochrany RoCoF vyplývají jednak z obecných požadavků na výstupní signály ochrany, které jsou stejné, jako u ostatních ochranných funkcí, a jednak z použitého algoritmu vyhodnocení rychlosti změny frekvence za čas. Aby se modelovaná funkce výpočtu rychlosti změny frekvence dala v dostatečně široké míře a s dostatečnou funkčností a přesností použít v simulacích, je nutné zvolit vhodný, avšak ne zbytečně složitý algoritmus.

Funkce je realizována v rámci funkce O05 – RoCoF, jejíž popis je uveden v příslušném odstavci kapitoly 9.1.5.

9.1.4 Komunikace

Komunikace mezi modely různých prvků – modely zdrojů a modely agenta je prací řešena z důvodu přizpůsobení použitelnosti modelů pro simulace, které mají za cíl zkoumat návaznosti komunikace v rámci např. tzv. chytrých sítí.

Funkce komunikace v rámci modelu zdroje by měla zajistit možnost nastavit konfiguraci předávání informací mezi jednotlivými modely. Modul komunikace musí zajišťovat sběr potřebných/požadovaných informací z ostatních modulů daného modelu, seřadit tyto informace do formátu, který bude jasně definovat pozice proměnných a odevzdat tyto informace na svůj výstup.

Zároveň musí umět přijímat informace mezimodelové komunikace připojené na svůj vstup a tyto informace správně předat ostatním modulům v daném modelu.

Funkce mezimodelové komunikace je řešena v rámci funkce F21 – Vnější komunikace, která je jedinou funkcí modulu komunikace. Podobná funkce je použita i v modelu agenta.

9.1.5 Funkce modelu zdroje

Požadavků na modely zdrojů existuje celá řada. Některé požadavky vychází z požadavků PDDS, resp. RfG, jiné jsou potřebné pro zajištění dalších návazností jako např. měření, ochrany či synchronizace a jiné jsou zase například potřebné pro správný chod simulace.

Navazující výpis funkcí je výčtem základních požadavků na model zdroje a odkazuje jedním směrem na legislativní požadavky popsané v teoretických kapitolách a druhým směrem na konkrétní popis a umístění funkce v modelu zdroje.

Modely neřeší přímo problematiku OZ. Z toho důvodu není realizovaná funkce zvláštní ochrany VM pro nezpůsobené odpojení výroby při OZ. Ochrany modelu zdroje jsou koncipovány v rozmezí přepětových, podpětových a frekvenčních ochran. (To neznamená, že problematika OZ nemůže být postulovanými modely zkoumána! – schéma simulace řešící OZ je nutné sestavit a nakonfigurovat zvlášť, vně modelů VM a agentů.)

Požadavek na schopnost měření vybraných elektrických parametrů vychází z potřeb užití konkrétních parametrů v návaznostech, zejména řídicích, ochranných a synchronizačních funkcí modelu zdroje. Všechny parametry určené funkcí/modulem měření jsou počítány z okamžitých

průběhů fázových napětí a proudů v jednotlivých fázích systému. To zaručuje jasnou konzistentnost výstupních parametrů funkcí měření. Měřicí funkce jsou uvozeny symbolem **M**.

Řídicí a regulační funkce jsou stěžejním elementem funkce modelů zdrojů. Konkrétní řídicí a regulační funkce byly navrhovány a sestavovány s ohledem na požadovanou funkci modelů. Řídicí a regulační funkce jsou uvozeny symbolem **F**.

Ochranné funkce doplňují modely o úroveň, která dovoluje nastavit funkci jednotlivých stupňů ochran, čímž je umožněno simulovat chování zdroje, resp. ochran v mezních provozních podmínkách. Ochranné funkce jsou uvozeny symbolem **O**.

M01 – Frekvence

Funkce M01 má za úkol určení hodnoty frekvence. Frekvence je určována pro dvě místa – před a za zdrojovým vypínačem. Obě tato měření jsou použita v modulu synchronizace k ověření splnění jedné z fázovacích podmínek (F19 – Fázovací podmínky).

Dále je frekvence na straně zdroje (vzhledem ke zdrojovému vypínači) použita ve struktuře řízení VM pro funkce frekvenčně závislých režimů (F11 – $P = f(f)$, F12 – $P = f(f_-)$, F13 – $P = f(f_+)$), funkci umělé setrvačnosti (F18 – Umělá setrvačnost (pouze u U a IBG zdroje)), regulační obvod řízení SG (F07 – Řízení SG). V modulech řízení se pak uplatní parametry frekvence při resynchronizaci ostrova a sítě.

V modulu ochran je hodnota frekvence na straně zdroje použita pro funkce nad frekvenčních a podfrekvenčních ochran (O03 – ANSI 81U, O04 – ANSI 81O) a výpočet rychlosti změny frekvence – funkce RoCoF (O05 – ANSI 81R).

M02 – Činný a jalový výkon, účinník

Funkce M02 má za úkol určení velikostí činného a jalového výkonu. Velikosti okamžitých hodnot činného a jalového výkonu jsou důležité pro funkce mající schopnost určovat požadovaný výkon VM nebo výkon přímo regulovat. Tyto parametry tak nachází uplatnění v modulech řízení, v rámci funkcí F02 – Výběr a rampa požadovaných P a Q, F04 – Řízení IBG - slave, F07 – Řízení SG, F11 – $P = f(f)$, F12 – $P = f(f_-)$, F13 – $P = f(f_+)$, F14 – $P = f(U)$, F15 – $Q = f(P)$ a F16 – $Q = f(U)$.

M03 – Efektivní hodnota sdruženého napětí

Funkce M03 má za úkol určení velikosti efektivních hodnot napětí na straně zdroje a straně sítě – před a za zdrojovým vypínačem. Tyto hodnoty se uplatní v modulu synchronizace v rámci ověření jedné z fázovacích podmínek (F19 – Fázovací podmínky).

V modulu řízení jsou velikosti napětí určeny pro funkce výkonových závislostí (F14 – $P = f(U)$ a F16 – $Q = f(U)$) a funkci F05 – Řízení IBG - master – obvod napětí, kde se uplatní při resynchronizaci ostrova a sítě.

M04 – Fázový posun napětí

Funkce M04 má za úkol určení rozdílů fází napětí na straně zdroje a straně sítě – před a za zdrojovým vypínačem. Tato hodnota se uplatní v modulu synchronizace při určování jedné z fázovacích podmínek (F19 – Fázovací podmínky).

M05 – Napětí a proud v dq souřadnicovém systému

Funkce M05 má za úkol určení velikosti napětí a proudu v dq souřadnicovém systému. Tyto hodnoty jsou použity ve zvoleném regulačním schématu pro měničové zdroje – funkce F04 – Řízení IBG - slave.

F01 a F02 – Řízení činného výkonu v závislosti na provozních podmínkách

Funkce F01 a F02 vychází z požadavku RfG (článek 14.2) resp. PPDS (příloha 4, kapitola 9.3.4). Požadavek je popsána v kapitole PPDS 9.3.4, která je součástí kapitoly 3.1.1.

Požadovaná vlastnost možnosti snížení činného výkonu na základě vnějšího požadavku se v modelu zdroje promítne jako možnost zadat požadovaný výkon zdroje nejen jako konkrétní hodnotu, ale také pomocí proměnné, kterou lze během průběhu simulace měnit. To nabízí uživateli možnost libovolně měnit žádanou hodnotu činného výkonu i v průběhu simulace. Toto je úkolem funkce F01 – Nominální a požadovaný P, která je popsána v kapitole 10.1.7.

Gradientsy změn činného výkonu zdroje jsou zadávány jako požadované rampy změn výkonů. Popis realizace této funkce v modelu zdroje je uvedena v kapitole F02 – Výběr a rampa požadovaných P a Q, která je součástí kapitoly 10.1.7.

Součástí požadavků na VM uvedených v PPDS 9.3.4 je i požadavek na aplikaci prahové hodnoty pro opětovné zvyšování výkonu po omezení způsobeném nárůstem frekvence. To je zakomponováno do funkce F13 – $P = f(f_+)$.

F03 – Určení regulačního módu

Provozu VM je možné rozdělit do čtyř různých provozních stavů. (V tomto případě se nejedná o typ regulace přifázovaného VM tak, jak určuje nastavení funkcí ohledně PQUf regulací.) Přechody mezi provozními stavy je možný na základě různých podmínek, stavu různých parametrů a povelů.

Prvním možným stavem je stav nepřifázovaného a v počátku neinicializovaného VM. VM v tomto módu má za úkol přifázovat se na síť, do které má dodávat výkon. Tomu odpovídá, jako u dalších stavů, určité nastavení, vstupy a funkce hlavního regulátoru VM. Tento mód je v následujícím textu označován jako *ctrlmode 0*.

Druhý stav – mód, je inicializován úspěšným přifázováním VM a začíná procesem zvyšování výkonu na žádané parametry. V tomto módu je obecně snaha provozovat VM. Zde se uplatňují další možnosti regulace jako jsou závislosti činného výkonu, jalového výkonu, napětí v místě připojení či v určitém uzlu sítě a frekvence navzájem, v závislosti na nastavení požadovaných funkcí. Jedná o tzv. normální provozní stav VM. Tento mód je v následujícím textu označován jako *ctrlmode 1*.

Třetí mód se vyznačuje schopností VM regulovat podle žádaného napětí v místě připojení (či definovaném uzlu v síti) a žádané (zpravidla nominální) frekvence v síti, do níž dodává výkon. Tímto regulačním režimem má VM defacto schopnost hradit výkonovou dysbalanci v síti. VM pracující v tomto módu může být označován jako tzv. pilotní či bilanční zdroj v soustavě nebo ostrově anebo také tzv. master zdroj v kontextu terminologie NVM. Tento mód je v následujícím textu označován jako *ctrlmode 2*.

Čtvrtý mód se vyznačuje úkolem VM splnit podmínky pro znovupřipojení ostrova zpět ke zbytku soustavy (příp. obecně jiné soustavě/ostrovu). Tento proces je jiný jako samotné přifázování v rámci prvního módu – zde již VM pracuje do určité sítě, dodává určitý výkon a musí splnit připojovací podmínky v určitém uzlu/místě sítě. Vlastností tohoto módu logicky oplývá pouze VM,

který je schopen pracovat v módu třetím. Tento mód je v následujícím textu označován jako *ctrlmode 3*.

Signály a parametry vstupující do této funkce jsou signifikantní pro rozhodování o konkrétní volbě regulačního módu. S výstupem funkce – určením regulačního módu pak pracují zejména funkce F04 – Řízení IBG - slave, F05 – Řízení IBG - master – obvod napětí, F06 – Řízení IBG - master – obvod frekvence a F07 – Řízení SG, které zajišťují realizaci cílů jednotlivých provozních stavů.

Popis realizace této funkce v modelu zdroje je uvedena v kapitole F03 – Volič módů, která je součástí kapitoly 10.1.7.

F04 – Regulační obvod řízení IBG - slave

Funkce F04 musí umět zajistit regulaci v základním výkonovém módu (*ctrlmode 1*). Vstupem funkce jsou hodnoty požadovaného činného a jalového výkonu. Součástí této funkce musí být a je obvod, který dokáže VM regulovat v úvodním synchronizačním procesu (*ctrlmode 0*). Samotné regulační schéma je popsáno v kapitole F04 – Řízení IBG - slave, na straně 202 jako součást popisu řízení měničového zdroje. Tato funkce je logicky i součástí modulu řízení měničového zdroje upraveného pouze pro řízení v režimu slave, resp. PQ módu (popsaného v kapitole 10.1.8, strana 211).

Výstupem této funkce je požadovaná velikost a úhel napětí, ze kterých je v rámci funkce F10 – Požadované napětí střídače generován požadovaný signál pro samotný střídač.

Složitostí, kterou je nutné aplikovat je zajištění režimu sledování v případě, že daný regulační mód (*ctrlmode 0 až 3*) není v daném čase uplatňován. To přispívá ke složitosti struktury řízení, neboť zejména regulace v 2. až 4. módu (*ctrlmode 1 až 3*) musí umět navazovat na přechody mezi sebou navzájem. Tento požadavek se váže i funkcím F05, F06 a F07.

F05 – Regulační obvod řízení IBG - master – obvod napětí

Funkce F05 zajišťuje řízení modelu měničového VM v režimu master (*ctrlmode 2 a 3*). Konkrétně, funkce se stará o generování požadavku velikosti amplitudy napětí pro střídač měničového zdroje. Obvod je také schopen zpracovat odchylku napětí při požadavku na resynchronizaci ostrova a sítě.

F06 – Regulační obvod řízení IBG - master – obvod frekvence

Funkce M06 doplňuje funkci M05 o generování požadované velikosti frekvence napětí, která se uplatní v případě funkce měničového VM v režimu master. Právě parametr frekvence je totiž signifikantní pro schopnost zajištění výkonové bilance vzniklého ostrovního provozu.

F07 – Regulační obvod řízení SG

Na rozdíl od měničového zdroje, hlavní regulační obvod pro řízení SVM je tvořen jedním regulačním algoritmem. Funkce F07 tak zajišťuje řízení SG ve všech čtyřech režimech provozu (*ctrlmode 0 až 3*). Vstupem jsou příslušné parametry reprezentující požadavek na regulaci v rámci konkrétního módu, a výstupem jsou reference požadovaného svorkového napětí SG (který vstupuje do prvku budiče) a požadovaný mechanický točivý moment SG (který vstupuje přes nastavitelné integrátory reprezentující odezvu regulačních ventilů a turbíny do prvku synchronního stroje).

F08 – Určení parametrů regulačního obvodu v závislosti na regulačním módu pro IBG

Regulační obvody F04 až F06 mohou vykonávat svou funkci vždy v různých režimech provozu. Funkce F08 zajišťuje, aby v rámci konkrétního regulačního módu byly v každém PI regulátoru v rámci řízení VM vždy nastaveny požadované proporcionální a časově integrační konstanty, a to zvláště jak pro dobu, kdy je daný PI regulátor využíván k regulaci, tak i kdy je v režimu sledování a regulaci v daném čase nezajišťuje.

F09 – Určení parametrů regulačního obvodu v závislosti na regulačním módu pro SG

Podobně jako funkce F08 zajišťuje nastavení regulátorů uplatňujících se v rámci regulace měničového zdroje, tak funkce F09 zajišťuje totéž pro regulační obvod řízení SG. Jak bylo zmíněno v popisu funkce F07, regulační obvody pro řízení modelu SG jsou realizovány vždy stejnými PI regulátory ve všech regulačních módech (*ctrlmode* 0 až 3). To do značné míry zjednodušuje požadavky pro režim sledování, který se v tomto případě neuplatní. Výstupem funkce je uživatelem nastavená hodnota proporcionálního zesílení a integrační časová konstanta pro aktuální regulační režim (*ctrlmode* 0 až 3).

F10 – Generování požadovaného napětí střídače

Funkce F10 se uplatní pouze u měničových zdrojů, neboť právě u těchto existuje požadavek na generování požadovaného průběhu výstupního napětí střídače. Tento požadavek je ve střídavých sítích v podstatě založen na parametrech amplitudy, frekvence a fáze. Funkce tak musí zajistit generování potřebného signálu v závislosti na frekvenci sítě nebo požadované frekvenci sítě, požadované amplitudy a požadované fáze. Výstupy regulátoru F04 jsou právě amplituda a fáze, které se uplatní spolu s frekvencí sítě v prvních dvou módech řízení (*ctrlmode* 0 a 1). Výstupy regulátorů F05, resp. F06 jsou amplituda, resp. frekvence, které se uplatní v druhých dvou módech (*ctrlmode* 2 a 3).

F11 – Frekvenčně závislý režim

Funkce F11 vychází z požadavku RfG (článek 15.2 d)) resp. Kodexu PS (část I., kapitola 4.8 kodexu [2]). Funkce je popsána v kapitole Kodex 4.8 (strana 69), která je součástí kapitoly 3.1.1.

V podstatě se jedná o primární regulaci frekvence a činného výkonu, která je inicializována po překročení necitlivosti frekvenční odezvy podle rovnice 9.1 až do dosažení hodnoty pásma necitlivosti frekvenční odezvy (f_{db}) nebo nastaveného rozpětí činného výkonu ($\Delta P_1/P_{max}$).

Funkce je dána rovnicí:

$$P_{\text{žádaný F11}} = \begin{matrix} P_{r/a} + P_{nom} \cdot \frac{\Delta f_2 - \Delta f}{f_n} \cdot \frac{100}{s_2} & \text{pro } \Delta f_{ins} < |\Delta f| < \Delta f_{db} \vee \Delta P < \frac{\Delta P_1}{P_{max}} \\ \text{poslední } P_{\text{žádaný F11}} & \text{pro } |\Delta f| \geq \Delta f_{db} \end{matrix} \quad (9.1)$$

kde $P_{r/a}$ je žádaná hodnota činného výkonu VM nebo aktuální hodnota výkonu VM v čase překročení prahové hodnoty frekvence (dle nastavení); P_{nom} je nominální hodnota činného výkonu VM; Δf_2 je odchylka (od nominální hodnoty) prahové hodnoty frekvence pro aktivaci poskytování frekvenční odezvy činného výkonu; Δf je odchylka frekvence (od nominální hodnoty) v síti; f_n je nominální hodnota frekvence v síti; s_2 je statika charakteristiky $P = f(f)$.

Výstupem funkce je požadovaný činný výkon VM. Popis realizace této funkce v modelu zdroje je uvedena v kapitole F11 – $P = f(f)$, která je součástí kapitoly 10.1.7. Funkce je v modelu volitelná (blokovatelná).

F12 – Odezva v omezeném frekvenčně závislém režimu při podfrekvenci

Funkce F12 vychází z požadavku RfG (článek 15.2 c)) resp. PPDS (příloha 4, kapitola 9.3.2.1 pravidel). Funkce je popsána v kapitole PPDS 9.3.2.1 (strana 65), která je součástí kapitoly 3.1.1. PPDS a RfG neinterpretují tuto funkci úplně stejně. Ač by tato funkce měla být dle PPDS součástí regulací akumulčního zařízení, bylo rozhodnuto zahrnout tuto funkci i do modelu zdroje.

Funkce F12 nesmí být zaměňována s požadavkem uvedeným v kapitole PPDS 9.3.2. Ten definuje požadovanou odolnost VM, který nedisponuje možností primární regulace (master), ani možností aplikace funkce F12. K problematice regulace činného výkonu v závislosti na frekvenci se vyjadřuje kapitola Regulace činného výkonu v závislosti na frekvenci, která je součástí kapitoly 9.1.2 (strana 140).

Funkce F12 je podobná funkci F13. Na rozdíl od ní ale působící svým výstupem opačným směrem a reaguje na pokles frekvence. Směr působení výstupu je u této funkce komplikace. Požadavek na zvýšení výkonu je podmíněn dostatkem disponibilního výkonu – dostatkem výkonové rezervy. Proto je tato funkce v PPDS přiřazena akumulčním zařízením. Nicméně existuje oprávněná možnost práce zdroje se sníženým výkonem tak, aby v případě potřeby výpomoci primární regulaci frekvence zapůsobila tato regulace proti poklesu hodnoty frekvence požadavkem na zvýšení výkonu zdroje.

Funkce je dána rovnicí:

$$P_{\text{žádaný F12}} = \begin{cases} P_a + P_{nom} \cdot \frac{\Delta f_2 - \Delta f}{f_n} \cdot \frac{100}{s_2} & \text{pro } \Delta f < \Delta f_1 \\ 0 & \text{pro } \Delta f \geq \Delta f_1 \end{cases} \quad (9.2)$$

kde P_a je aktuální hodnota výkonu VM v čase podkročení prahové hodnoty frekvence; P_{nom} je nominální hodnota činného výkonu VM; Δf_2 je odchylka (od nominální hodnoty) prahové hodnoty frekvence pro aktivaci poskytování frekvenční odezvy činného výkonu; Δf je odchylka frekvence (od nominální hodnoty) v síti; f_n je nominální hodnota frekvence v síti; s_2 je statika charakteristiky $P = f(f-)$.

Popis realizace této funkce v modelu zdroje je uvedena v kapitole F12 – $P = f(f-)$, která je součástí kapitoly 10.1.7. Funkce je v modelu volitelná (blokovatelná).

F13 – Odezva v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci

Funkce F13 vychází z požadavku RfG čl. 13.2, resp. PPDS (příloha 4, kapitola 9.3.1 pravidel). Funkce je popsána v kapitole PPDS 9.3.1 (strana 63), která je součástí kapitoly 3.1.1.

Rovnici výpočtu statiky tak jak je uvedena v obr. 3-13 (v kapitole PPDS 9.3.1, na straně 64) lze užitečněji přeformulovat do formy uvedené rovnicí 9.3. Požadovanou neznámou v rovnici 9.3 je hodnota činného výkonu, která musí jako žádaná hodnota vstupovat na regulátor výkonu zdroje. Na vstupu žádané hodnoty výkonu na regulátoru výkonu VM je nutné tuto hodnotu porovnat s požadavky dalších funkcí, které mají schopnost nějakým způsobem ovlivnit výkon VM. Výstupem porovnání je minimální hodnota ze všech požadavků žádané hodnoty výkonu.

Funkce je dána rovnicí:

$$P_{\text{žádaný F13}} = \begin{cases} P_{n/a} + P_{nom} \cdot \frac{\Delta f_1 - \Delta f}{f_n} \cdot \frac{100}{s_2} & \text{pro } \Delta f > \Delta f_1 \\ P_{nom} & \text{pro } \Delta f \leq \Delta f_1 \end{cases} \quad (9.3)$$

kde $P_{n/a}$ je nominální hodnota činného výkonu VM nebo aktuální hodnota výkonu VM v čase překročení prahové hodnoty frekvence (dle typu VM); P_{nom} je nominální hodnota činného výkonu

VM; Δf_l je odchylka (od nominální hodnoty) prahové hodnoty frekvence pro aktivaci poskytování frekvenční odezvy činného výkonu; Δf je odchylka frekvence (od nominální hodnoty) v síti; f_N je nominální hodnota frekvence v síti; s_2 je statika charakteristiky $P = f(f+)$.

Pro synchronní VM platí, že výstupní hodnota algoritmu výpočtu podle rovnice 9.3 je vztažena k maximální kapacitě. U nesynchronních VM tomu může být stejně nebo lze poměrnou hodnotu vztáhnout ke skutečnému (aktuálnímu) činnému výkonu na výstupu VM v okamžiku, kdy bylo dosaženo prahové hodnoty omezeného frekvenčně závislého režimu při nadfrekvenci.

Popis realizace této funkce v modelu zdroje je uvedena v kapitole F13 – $P = f(f+)$, která je součástí kapitoly 10.1.7. Funkce je v modelu volitelná (blokovatelná).

F14 – Snížení činného výkonu závisle na napětí – funkce P(U)

Funkce F14 vychází z požadavku PPDS (příloha 4, kapitola 9.3.3 pravidel). Funkce je popsána v kapitole PPDS 9.3.3 (strana 66), která je součástí kapitoly 3.1.1.

Požadavek pro tuto funkci uvedený v kapitole PPDS 9.3.3 lze přeformulovat do podoby určené rovnicí 9.4. Výstupem algoritmu je požadavek na maximální možný výkon zdroje. Při překročení poměrné velikosti napětí v místě připojení U_1/U_n dochází ke snižování maximálního možného výkonu zdroje až po poměrnou hodnotu U_2/U_n , se směrnici danou poměrnými hodnotami U_1/U_n a U_3/U_n .

$$P_{\text{žádaný F14 (pu)}} = \begin{cases} 1 & \text{pro } U_{akt}/U_n < U_1/U_n \\ \frac{1}{\frac{U_1}{U_n} \cdot \frac{U_3}{U_n}} \cdot \frac{U_{akt}}{U_n} + \frac{1}{1 - \frac{U_1}{U_n} \cdot \frac{U_3}{U_n}} & \text{pro } U_1/U_n < U_{akt}/U_n < U_2/U_n \\ 1 - \frac{\frac{U_2}{U_n} \cdot \frac{U_1}{U_n}}{\frac{U_3}{U_n} \cdot \frac{U_1}{U_n}} & \text{pro } U_2/U_n < U_{akt}/U_n \end{cases} \quad (9.4)$$

kde U_{akt} je aktuální hodnota napětí v místě připojení zdroje; U_n je nominální napětí v místě připojení zdroje; U_1/U_n je poměrná hodnota napětí prvního zlomu charakteristiky $P = f(U)$; U_2/U_n je poměrná hodnota napětí druhého zlomu charakteristiky $P = f(U)$; U_3/U_n je poměrná hodnota napětí použita spolu s U_1/U_n pro určení směrnice udávající pokles výkonu v závislosti na napětí.

V programu PSCAD existuje možnost nahrazení prostřední funkce rovnice 9.4. Za použití prvku se zadanou funkcí (prvek X-Y Transfer Function) lze onu klesající funkci jednoduše definovat pomocí dvou bodů. Do toho stejného prvku lze rovnou zadanou i první funkci rovnice 9.4. Pro aplikace třetí funkce rovnice 9.4 byla použita funkce maxima (prvek Maximum/Minimum Function), která zajistí konstantní výstup po splnění platnosti třetí podmínky rovnice 9.4.

Popis realizace této funkce v modelu zdroje je uvedena v kapitole F14 – $P = f(U)$, která je součástí kapitoly 10.1.7. Funkce je v modelu volitelná (blokovatelná).

F15 a F16 – Způsoby řízení jalového výkonu

Funkce F15 vychází z požadavku RfG (článek 21.3 d)) resp. PPDS (příloha 4, kapitola 9.4.1 pravidel). Funkce je popsána v kapitole PPDS 9.4.1 (strana 67), která je součástí kapitoly 3.1.1.

Požadované schopnosti regulace uvedené v kapitole PPDS 9.4.1 – $Q \text{ fix}$, $Q(U)$, $Q(P)$, $\cos\phi \text{ fix}$, $\cos\phi(U)$, $\cos\phi(P)$ a zadaná hodnota napětí jde s výhodou rozdělit do dvou skupin. První skupinou, jsou závislosti, které přiřazují jalovému výkonu či účinníku právě jednu hodnotu v závislosti na činném výkonu. Mezi tyto regulace patří $Q \text{ fix}$, $Q(P)$, $\cos\phi \text{ fix}$ a $\cos\phi(P)$ (vč. $Q = 0$,

resp. $\cos\varphi = 1$). Tyto regulace jsou zařazeny do funkce F15, která je popsána v kapitole F15 – $Q = f(P)$ (součást kapitoly 10.1.7). Dá se říct, že tato první skupina regulací jalového výkonu zároveň vytváří pracovní oblast pro druhou skupinu regulací – regulace $Q(U)$ a $\cos\varphi(U)$. Veskrze jde vždy o regulaci jalového výkonu, a proto je možno se zabývat pouze regulací $Q(U)$. Tato regulace tvoří funkci F16, která je v popsána kapitole F16 – $Q = f(U)$ (součást kapitoly 10.1.7). Funkce F15 i F16 jsou volitelné (blokovatelné).

Funkce F16 zároveň vychází z požadavku PPDS (příloha 4, kapitola 9.4.2 pravidel). Funkce je popsána v kapitole PPDS 9.4.2 (strana 68), která je součástí kapitoly 3.1.1.

Problematika těchto PQU regulací a podrobnější vysvětlení rozdělení provedeného v této kapitole je popsána v kapitole 3.3.4.

F17 – Rychlý poruchový proud

Schopnost poskytovat jalový poruchový proud skrze modul řízení je požadavkem na NVM. Funkce musí být schopna na základě změřené odchylky napětí ovlivnit výstup silové části VM v závislosti podle diagramu na obr. 3-12 (strana 62) a která je např. podle [125] definována rovnicí:

$$\Delta I_b = \frac{U - U_0}{U_N} \cdot I_N \cdot k \quad (9.5)$$

kde ΔI_b je přídavný jalový proud během poruchy, tedy rozdíl jalového proudu během poruchy a před poruchou; U je napětí během poruchy; U_0 je napětí před poruchou, brána jako průměrná hodnota za dobu jedné minuty; I_N je jmenovitý proud; k je koeficient vyjadřující dosah dodávaného proudu jalového charakteru, který by měl být nastavitelný v rozsahu od 2 do 6.

Vzhledem k charakteru použitelnosti postulovaných modelů v simulačním prostředí byla zvolena varianta rovnice vztahu mezi změnou napětí a velikostí přídavného jalového proudu podle zjednodušené rovnice uvedené v PPDS [47]:

$$\Delta i = k \cdot \Delta u \quad (9.6)$$

kde Δi je příspěvek okamžité hodnoty proudu v procentech jmenovitého proudu; k je koeficient vyjadřující dosah proudu jalového charakteru ($k \in [2; 6]$); Δu je odchylka napětí od jmenovité hodnoty v procentech.

Výstupní hodnota požadované změny musí být implementována do funkce řízení, resp. regulačního obvodu modelu VM.

F18 – Umělá setrvačnost

Schopnost poskytovat umělou setrvačnost je požadavkem na NVM. Problematika setrvačnosti je popsána v kapitole 2.4. Např. dle [126] existuje více možností, jak do struktury řízení implementovat funkci umělé setrvačnosti. S úvahou, že energie setrvačných hmot synchronního generátoru je poskytována vesměs okamžitě při změně frekvence, je vhodné funkci umělé setrvačnosti ve struktuře řízení aplikovat co nejbližší samotnému zdroji.

Vzhledem k tomu, že model zdroje je obdařen i frekvenčně závislým režimem, který reaguje na absolutní velikost odchylky frekvence od nominální (požadované) hodnoty, je funkce umělé setrvačnosti aplikována jednosmyčkově¹⁹ – pouze v závislosti na rychlosti změny frekvence (RoCoF). O výpočet RoCoF se pro tuto funkci stará algoritmus, který je součástí modulu řízení. (V rámci modelů VM je realizován ještě výpočet RoCoF v modulu ochran, čistě pro účely ochranné

¹⁹ Viz poslední odstavec na straně 48.

funkce O05 – RoCoF.) Nastavení výpočtu RoCoF pro účely umělé setrvačnosti je tak umístěn v nastavení modulu řízení měničových zdrojů.

F19 – Fázovací podmínky

Pro činnost funkce F20 – Synchronizace a resynchronizace je nezbytně nutné vyhodnocovat napěťové poměry na obou stranách zdrojového vypínače. Funkce F19 musí správně porovnat parametry velikosti amplitudy, fáze a frekvence napětí a rozhodnout o splnění či nesplnění konkrétní fázovací podmínky.

Popis realizace této funkce v modelu zdroje je uvedena v kapitole F19 – Fázovací podmínky, která je součástí kapitoly 10.1.12. Funkce je v modelu pevná.

F20 – Synchronizace a resynchronizace

Schopnost VM nafázovat se na síť je jednou ze základních funkcí každého zdroje. Jedná se o specifický režim regulace, kdy VM musí obecně dosáhnout na svých svorkách požadovaných napěťových parametrů – velikost, fáze, frekvence. Funkce, která fázování zdroje zajišťuje má návaznost na hlavní regulační obvod (funkce F04 – Regulační obvod řízení IBG - slave a F07 – Regulační obvod řízení SG) a je mu zdrojem potřebných informací jednak ve stavu fázování a jednak ve stavu resynchronizace OP se sítí. Samotná funkce F20 pracuje s informacemi z funkce F19 – Fázovací podmínky. Funkce F20 má důležitou návaznost na funkci F03 – Určení regulačního módu, které podává informaci o stavu povelu připojení k síti – stav zdrojového vypínače. Výstupem této funkce je povel požadovaného stavu zdrojového vypínače. Tato funkce má také návaznost na požadavek obnovy činného výkonu po poruše uvedený v RfG (Obnovení činného výkonu po poruše).

Popis realizace této funkce v modelu zdroje je uvedena v kapitole F20 – Synchronizační logika, která je součástí kapitoly 10.1.12. Funkce je v modelu pevná.

F21 – Vnější komunikace modelu zdroje

Funkce F21 musí zajistit sběr informací z modulů modelu VM a seřazení informací do formátu, se kterým umí pracovat všechny ostatní vytvořené komponenty, které s komunikací pracují. V rámci této funkce by také měla logicky být aplikována možné nastavení zpoždění informace simulující čas přenosu a zpracování dat – zprávy. Nicméně standardní prvek pro funkci časového zpoždění (prvek Delay) neumožňuje nastavit proměnnou hodnotu časového zpoždění. To sebou nese problém zahrnutí parametru časového zpoždění do možností nastavení v rámci uživatelského rozhraní. Případné řešení použitím vlastní definice pak naráží na problém, kdy by byla potřeba definovat velikost potřebného bufferu hodnot. Pro širokou možnost nastavení (pro velké časy zpoždění) by bylo nutné velikost bufferu vytvořit dostatečně velkou, což by spolu s nastavenou nízkou hodnotou časového kroku simulace vedlo k velké časové náročnosti simulace. Případné požadované časové zpoždění přenosu informace se tak musí definovat v rámci modulu komunikační ústředny (popsané v kapitole 9.7.1 na straně 159).

F22 – Výstup modulu ochran VM

Výstupy ochranných funkcí O01 až O05 musí být v rámci modulu ochrany interpretovány jednotně v rámci dvou možných výstupních signálů – popud k odpojení VM od sítě (povel na vypnutí vývodového vypínače), resp. povel inicializace přechodu do ostrovního provozu VM. Funkce realizující výstup všech stupňů ochran je tak veskrze prostá – seskupení výstupů dílčích

ochranných funkcí pomocí funkce logického součtu do dvou zmíněných souhrnných výstupních signálů.

O01 – Podpět'ové relé

Funkce O01 vychází z požadavků na chránění VM uvedených v kapitole 3.4 (strana 97). Princip funkce je pak popsán v kapitole ANSI 27 (strana 38) v rámci kapitoly 2.2.2. V rámci funkčního algoritmu tohoto typu ochrany lze uvažovat celou řadu parametrů. Realizace této funkce, včetně popisu algoritmu a nastavení je uveden v kapitole O01 – ANSI 27 (strana 216), která je součástí kapitoly 10.1.11.

O02 – Nadpět'ové relé

Funkce O02 vychází z požadavků na chránění VM uvedených v kapitole 3.4 (strana 97). Princip funkce je pak popsán v kapitole ANSI 59 (strana 38) v rámci kapitoly 2.2.2. V rámci funkčního algoritmu tohoto typu ochrany lze uvažovat celou řadu parametrů. Realizace této funkce, včetně popisu algoritmu a nastavení je uveden v kapitole O02 – ANSI 59 (strana 219), která je součástí kapitoly 10.1.11.

O03 – Podfrekvenční relé

Funkce O03 vychází z požadavků na chránění VM uvedených v kapitole 3.4 (strana 97). Princip funkce je pak popsán v kapitole ANSI 81U (strana 39) v rámci kapitoly 2.2.2. V rámci funkčního algoritmu tohoto typu ochrany lze uvažovat celou řadu parametrů. Realizace této funkce, včetně popisu algoritmu a nastavení je uveden v kapitole O03 – ANSI 81U (strana 220), která je součástí kapitoly 10.1.11.

O04 – Nadfrekvenční relé

Funkce O04 vychází z požadavků na chránění VM uvedených v kapitole 3.4 (strana 97). Princip funkce je pak popsán v kapitole ANSI 81O (strana 39) v rámci kapitoly 2.2.2. V rámci funkčního algoritmu tohoto typu ochrany lze uvažovat celou řadu parametrů. Realizace této funkce, včetně popisu algoritmu a nastavení je uveden v kapitole O04 – ANSI 81O (strana 221), která je součástí kapitoly 10.1.11.

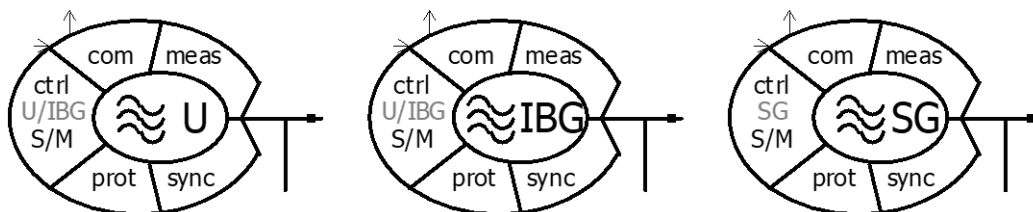
O05 – RoCoF

Funkce O05 vychází z požadavku na ochranné funkce VM dle RfG čl. 13.1 b), resp. PPDS (příloha 4, kapitola 9.1.1). Požadavek na funkci je uveden v kapitole PPDS 9.1.1, která je součástí kapitoly 3.1.1.

Funkce RoCoF může být pro určité účely používána v kombinaci s podmínkou poklesu napětí pod určitou mez ve funkci logického součinu. To uvádí např. [127]. V rámci modulu ochran prezentovaném v této práci však bylo adoptováno schéma funkce RoCoF uvedené v [28]. V prvním kroku je získán průběh fázových napětí v místě měření (obvykle místo připojení zdroje k síti) a určena frekvence systému – to je v modelech realizované v rámci modulů měření. Další kroky jsou už realizovány v rámci funkce RoCoF. Je provedena derivace signálu frekvence (df/dt) ve zvoleném časovém okně (dt) (obvykle voleno v intervalu 2 až 40 period, což pro 50Hz síť odpovídá 0,04 až 0,80 sekundám) následovaném dolnopropusným filtrem a porovnáním se zadanou prahovou hodnotou (označovanou β) pro aktivaci popudu.

9.2 Architektura modelu zdroje

Studiem a úvahami nad smysluplným a maximálně funkčním pojetím architektury modelů VM vzniklo rozdělení modelů zdrojů na celkem 6 modulů, které jsou jednotlivě popsány v následujících odstavcích. Cílem bylo oddělit od sebe jednotlivé části tak, aby mohla být jednoduše konfigurovatelná vždy potřebná část zkoumaného systému. Na jednotlivé moduly lze také aplikovat různé požadavky, které se projeví hloubkou – podrobností modulu. Hloubka modulů je vždy popsána u popisu funkce modulu v kapitole 10.1. Společnou vlastností všech modulů je možnost uživatele nastavit příslušející parametry. Základní grafické zobrazení je uvedeno na obr. 9-2, kde jsou zobrazeny všechny tři varianty postulovaných zdrojů.



obr. 9-2: Základní architektura modelů zdrojů

Základním modulem modelu zdroje je **samotný zdroj** (*U*, *IBG*, *SG*). S ohledem na nutnost zkoumat chování různých typů zdrojů, je nutné implementovat jak možnost simulace *synchronního generátoru* (*SG*) – SVM, tak *zdroje měničového typu* (*IBG*) – NVM. Model synchronního stroje (pro *SG*) je součástí základní knihovny programu PSCAD. Je však nutné zajistit spoustu dalších návazností, zejména řízení tohoto typu zdroje. Střídač (pro *IBG*) lze vytvořit použitím prvků polovodičové techniky, které jsou také součástí hlavní knihovny. Pro spoustu simulací, kde je nutné zkoumat jiné návaznosti než konkrétní chování samotného zdroje, je výhodné použít v simulačním prostředí přímo napěťový zdroj. Pro další typy simulací tak byl realizován VM, jehož samotný zdroj je tvořen *napěťovým zdrojem* (*U*), který využívá stejného modulu řízení (*ctrl*) jako *IBG*. Tak lze do určité míry zjednodušit výpočetní matici daného projektu při zachování požadované funkce a vlastností zdroje. Není totiž vždy nutné použít plný, kompletní model zdroje elektrické energie. Problematika tzv. full a average modelu je popsána v kapitole 6.2.1 (strana 116). Modul samotného zdroje musí dále umět realizovat požadavek na sepnutí či odepnutí zdroje vzhledem k síti – realizovat povely na zdrojový vypínač²⁰.

Nedílnou součástí každého zdroje musí být prostředek, který zajistí měření síťového napětí, napětí zdroje a výstupního proudu zdroje. K tomuto účelu byl zakomponován **modul měření** (*meas*). Základní presumpce pro modul měření je schopnost měřit *okamžité hodnoty napětí* před a za zdrojovým vypínačem a *okamžité hodnoty výstupního proudu* zdroje. Následovat musí proces zpracování a poskytnutí signálu pro další moduly, které informace z měření a výpočtů potřebují pro svou funkci – modul řízení, modul ochrany a modul synchronizace. V modulu měření musí být realizován uživatelský výstup dat z měření tak, aby si uživatel mohl pohodlně vyvést potřebné signály na zobrazovací prvky.

Pro možnost realizace komunikace mezi zdrojem a ostatními prvky simulované sítě musí existovat **modul komunikace** (*com*). Současné požadavky na funkcionality zdrojů elektrické energie jsou často spjaté s možností komunikace. Modul komunikace musí umět zajistit

²⁰ Pojmem *zdrojový vypínač* je v rámci celé práce myšlen vypínač na vývodu VM, který je napojený za přípojnici vlastního odběru VM.

požadovaný *přenos výstupních dat* mimo model zdroje, stejně tak jako zajistit *příjem vstupních dat* a jejich případné zpracování a předání dalším modulům zdroje.

Aby mohl samotný zdroj plnit svou funkci – dodávat elektrickou energii, je nutné ho nějakým způsobem řídit. K tomuto účelu byl zakomponován **modul řízení** (*ctrl*). Schémat automatických regulací různých zdrojů existuje celá řada. Volbu regulačního algoritmu bylo nutné zvážit nejen s ohledem na synchronní provoz v oblasti nominálních výkonů, ale i v rámci požadavku plné funkčnosti v oblastech fázování zdroje, ostrovním provozu, okrajových provozních podmínek a resynchronizace. Algoritmy pro řízení zdroje v různých provozních režimech (*fázování, normální provoz, ostrovní provoz, resynchronizace ostrova na síť*) je samozřejmě nutné volit na základě určitých podmínek. Proto musí existovat nadřazený *algoritmus provozních režimů*, který zajistí přechody mezi režimy řízení – tzv. módy. V modulu řízení se musí uplatňovat požadavek na zvolený typ *výkonové charakteristiky*. Požadavek na schopnost práce zdroje v různých provozních režimech spolu s uplatněním konkrétní výkonové charakteristiky v sobě zahrnuje požadavek na volbu funkce zdroje jako pilotního, regulačního či PQ zdroje.

Součástí reálných zdrojů jsou ochrany. Filozofie elektrických ochrany je nastíněna v kapitole 2.2.2. Součástí modelu zdroje tak musí být **modul ochrany** (*prot*). Funkce modulu ochrany zahrnuje schopnost vypnutí zdrojového vypínače na základě překročení nastavených mezí elektrických parametrů.

Posledním modulem, který je součástí modelu zdroje je **modul fázování** (*sync*), který má za úkol hlídání fázovacích podmínek při připojování zdroje na síť.

9.3 Požadavky na model agenta

Z teoretického popisu MAS uvedeném v kapitole 5 - Multiagentní systémy (od strany 105) lze vyjít při sestavování a popisu požadavků na model agenta. Obecně neexistuje soustava požadavků na realizaci agenta, což je dáno vesměs širokou škálou toho, co můžeme za agenta označit. Nicméně lze vyjít právě z popisů jednotlivých typů agentů a sestavit tak obecný model agenta, který bude konfigurovatelný a nastavitelný tak, aby mohl být použit pro různé typy studií, pro různé úkoly, využívající různé funkce.

Společným prvkem velké skupiny agentů je vypínač, který spojuje dvě části vedení, přípojnice, sekce rozvody apod. Povelovat tento vypínač musí umět nejen samotný agent, ale i příkaz vstupující z dálkové komunikace agenta. Tak lze zajistit možnost aplikovat do kompetence modelu agenta různou úroveň řízení – autonomní/externí.

Aby mohl agent vykonávat požadované funkce, musí umět získávat informace jednak ze svého okolí – pomocí komunikace, ale i z místa svého umístění – měřením okamžité hodnoty napětí a proudu. Z těchto okamžitých hodnot lze získat další parametry jako např. efektivní hodnotu napětí, směr a velikost toku výkonů a frekvenci. Pro možnost aplikace různých algoritmů MAS, je vhodné také znát a být schopen komunikovat stav vypínače (sepnuto/rozepnuto).

Důležitou vlastností mnoha typů agentů je zajištění ochranné funkce. S odkazem na kapitolu 5.6 (strana 112), která se zabývá popisem ochranných funkcí agentů, je nutné vybavit model agenta základní sadou ochranných funkcí.

Z rámce problematiky ostrovních provozů, konkrétně jejich resynchronizace se sítí je vhodné zahrnout mezi funkce agenta schopnost resynchronizace. Tato resynchronizace by měla být realizována ve spolupráci s příslušnými zdroji ostrova, které jsou schopny svou regulací ovlivňovat

parametry frekvence a napětí. Kontrola fázovacích podmínek musí být, vzhledem k rychlosti elektromagnetických dějů, v kompetenci přímo agenta.

Poslední nutnou entitou modelu agenta musí být schopnost dálkové, mezimodelové komunikace. Tato schopnost otevírá širokou škálu možností uplatnění agenta ať už v rámci řízení sítě nebo jako komponenty MAS. (Řízení provozu sítě lze samo o sobě chápat jako MAS.)

Požadované vlastnosti modelu agenta jsou uvedeny v tab. 9-2. (Popis významu jednotlivých sloupců je uveden v kapitole 9.1 (strana 135).) Název modulu ve sloupci tab. 9-2 odpovídá značení modulu v knihovně prvků (*Library_SG.pslx*) v programu PSCAD. Vyskytují se zde moduly vypínače (*A_breaker*), měření (*A_meas*), komunikace (*A_com*), ochrana (*A_prot*) a synchronizace (*A_sync*). Některé funkce jsou použity i modelech VM. Proto jsou odkazy na jejich popis odkazovány právě na popis dané funkce v rámci modelu VM.

tab. 9-2: Rozčlenění vlastností modelu agenta

označení funkce	název funkce	pevný / zrušitelný / blokovatelný	modul
M01	určení frekvence	pevný	A_meas
M02	určení činného a jalového výkonu a účinníku	pevný	A_meas
M03	určení efektivní hodnoty sdruženého napětí	pevný	A_meas
M04	určení fázového posuvu napětí	pevný	A_meas
M06	určení efektivní hodnoty proudu	pevný	A_meas
F40	logika povelů a blokad vypínače	pevný	A_breaker
F41	ověření splnění fázovacích podmínek	pevný	A_sync
F42	vnější komunikace modelu agenta	blokovatelný / zrušitelný	A_com
O01	podpětové relé	blokovatelný / zrušitelný	A_prot
O02	nadpětové relé	blokovatelný / zrušitelný	A_prot
O03	podfrekvenční relé	blokovatelný / zrušitelný	A_prot
O04	nadfrekvenční relé	blokovatelný / zrušitelný	A_prot
O05	RoCoF	blokovatelný / zrušitelný	A_prot
O06	nadproudové relé	blokovatelný / zrušitelný	A_prot

9.3.1 Funkce modelu agenta

Filozofie a rozsah možností postulovaného modelu agenta koresponduje s popisem funkcí modelu VM uvedeným na straně 144.

M01 až M04 – f, P, Q, U_s, dPh

Algoritmy těchto funkcí jsou totožné s algoritmy použitými v modelu VM, modulu měření. Jejich popis je uveden od strany 145. Hodnoty daných parametrů se uplatňují v modulu ochrana (efektivní hodnoty sdružených napětí, frekvence) a v modulu synchronizace (efektivní hodnoty

sdužených napětí, frekvence, fázový posun napětí). Hodnoty jsou dále možným uživatelským výstupem modulu měření a některé signálem dálkové komunikace.

M06 – Efektivní hodnota proudu

Funkce M06 má za úkol určení velikosti efektivních hodnot proudu fází procházející skrze agenta. Tyto hodnoty jsou dále využity v modulu ochran, v návaznosti nadproudových ochran, funkce O06 – ANSI 50.

F40 – Povelý a blokády vypínače

Funkce F40 musí zajistit správnou, požadovanou manipulaci silového vypínače agenta. Logika musí zajistit správnou chronologii a prioritu čtyř základních povelů. Prvním je povel na sepnutí vypínače, který může přijít od povelu uživatele nebo z vlastního synchronizačního modulu nebo z dálkové komunikace agenta. Druhým je povel na rozepnutí vypínače, který může přijít od povelu uživatele nebo z vlastního modulu ochrany nebo z dálkové komunikace agenta. Pro oba povelý pak ještě musí existovat blokáda jejich vykonání. Třetím, resp. čtvrtým povelem je pak blokáda sepnutí, resp. blokáda rozepnutí vypínače, která může přijít od povelu uživatele nebo z dálkové komunikace. Pro možnosti ověření různých nastavení a stavů agenta musí mít blokovací signály vyšší prioritu než signály na sepnutí a rozepnutí vypínače agenta.

F41 – Fázovací podmínky agenta

Funkce F41 je podobná funkci F19 v modulu synchronizace modelu VM. V rámci funkce jsou vyhodnocovány uživatelem nastavené odchylky parametrů pro fázovací podmínky – rozdíl velikostí fázových napětí, fázový posun napětí, frekvence napětí. Výstupem funkce je povel na sepnutí výkonového vypínače agenta.

Popis realizace této funkce v modelu zdroje je uvedena v kapitole F41 – Fázovací podmínky agenta, která je součástí kapitoly 10.2.5. Funkce je v modelu pevná.

F42 – Vnější komunikace modelu agenta

Funkce F42 musí zajistit sběr informací z modulů modelu agenta a seřazení informací do formátu, se kterým umí pracovat všechny ostatní vytvořené komponenty, které s komunikací pracují.

O01 až O05 – $U<$, $U>$, $f<$, $f>$, RoCoF

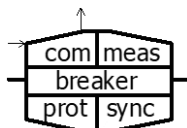
Sada těchto ochranných funkcí je podobná ochranným funkcím modelu VM, které jsou popsány od strany 153. Zjednodušení ne samotné funkce daného typu ochrany oproti té použité u VM nespočívá ve principu ochranné funkce samotné, ale platnosti ochrany v konkrétním provozním stavu – u modelu agenta je chápán pouze jediný provozní stav (ne jako u VM – master vs. slave, synchronní vs. ostrovní provoz) a dále tím logicky také v jediném výstupním povelu – odpojení/vypnutí vypínače (ne jako u VM – odpojení vs. přepnutí do ostrovního provozu).

O06 – Nadproudové relé

U modelu agenta má smysl v jeho základní struktuře ochran realizovat ochrannou funkci nadproudového relé. Princip funkce je pak popsán v kapitole ANSI 50 (strana 38) v rámci kapitoly 2.2.2.

9.4 Architektura modelu agenta

Pro model agenta bylo rozhodnuto o rozdělení jeho finální podoby do celkem pěti modulů, z nichž každý, podobně jako u modelu VM plní požadovanou funkci. Grafická podoba modelu agenta je zobrazena na obr. 9-3 a popis jednotlivých modulů je uveden v následujících odstavcích této kapitoly.



obr. 9-3: Architektura modelu agenta

Základním prvkem modelu agenta je **modul vypínače** (*breaker*). Ten má za úkol zajišťovat funkci samotného vypínače, který přísluší danému agentu. Jde tak o silovou část modelu agenta, která dále zajišťuje zpracování a vyhodnocení povelů na sepnutí a rozepnutí výkonového vypínače, které mohou přicházet od různých entit (vlastní moduly agenta, povel uživatele, dálková komunikace).

Pro mnoho funkcí agenta je zapotřebí měřit elektrické parametry související jednak s provozem agenta a jednak s provozem sítě, do které je agent zasazen. O tuto návaznost se stará **modul měření** (*meas*), který zpracovává *okamžité hodnoty napětí* na obou stranách vypínače a *okamžité hodnoty proudu* tekoucí skrze agenta v sepnutém stavu. Součástí modulu jsou i algoritmy výpočtů dalších síťových parametrů jako je frekvence napětí, činný a jalový výkon, fáze napěťové vlny, atd. To vše pro správnou funkci všech ostatních návazností tohoto modulu, vč. možnosti vyvedení potřebné informace k zobrazení mimo samotný modul.

Pro možnosti realizace komunikace mezi agentem a ostatními prvky simulované sítě musí existovat **modul komunikace** (*com*). Ten musí umět zajistit požadovaný *přenos výstupních dat* mimo model agenta, stejně tak jako zajistit *příjem vstupních dat* a jejich případné zpracování a předání dalším modulům agenta.

Agent může v mnoha případech zajišťovat i ochranné funkce, které jsou popsány v rámci kapitoly 2.2.2. Pro výběr a realizaci algoritmů ochran tak existuje **modul ochran** (*prot*). Výstupem tohoto modulu je požadavek na vypnutí vypínače agenta vlivem překročení nastavených limit ochran.

Posledním modulem, který je součástí modelu agenta je **modul fázování** (*sync*), který má za úkol hlídání fázovacích podmínek velikosti napětí, fází napětí a frekvence s výstupem v podobě požadavku na sepnutí vypínače agenta.

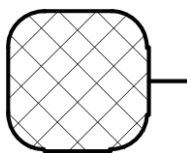
9.5 Požadavky na model sítě

Model sítě musí obecně nahradit/simulovat vnější síť, do které je zdroj připojen, do které pracuje. Zde přichází úvaha o velikosti sítě a jejich schopnostech. S ohledem na zkoumané fenomény v rámci této práce lze definovat potřebu simulovat především frekvenční a napěťové deviace. To vše musí být simulováno v rámci definovatelné velikosti sítě/soustavy. Obecně je potřeba simulovat celou nebo oproti zdroji násobně větší část ES. Zajímavější však je však zkoumat chování zdroje v menší, řekněme vyčleněné síti – ostrově, který obecně například nemusí mít regulační vlastnosti elektroenergetické soustavy jako primární regulace činného výkonu a frekvence.

Požadavek na model sítě je v podstatě takový, aby model v plném rozsahu zastupoval chování a vlastnosti jakékoliv sítě, do které může být zdroj připojen. S ohledem na požadavky simulací souladu pro synchronní a nesynchronní VM dle RfG resp. platných metodik musí být v rámci modelu sítě nastavitelné (a dále realizované) požadavky různých frekvenčních a napěťových ramp a skoků. V rámci modelu sítě jsou brány systémové služby jako celek – jako celková schopnost modelu.

9.6 Architektura modelu sítě

Architektura modelu sítě je jednoduchá. Obsahuje jeden modul, který realizuje celou funkci modelu sítě, včetně všech nastavení.



obr. 9-4: Architektura modelu sítě

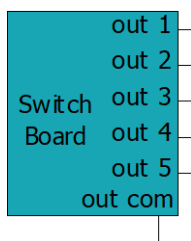
9.7 Ostatní modely

Pro usnadnění možnosti koncepce simulace s návaznostmi mimomodelové komunikace je užiteční mít modul, který uživateli usnadní práci se signálovými poli, které je nutné řešit v rámci definic předávaných informací mezi modely.

Dalším usnadněním je modul, jehož výstupem je požadovaná křivka limitu pro překlenutí poruchy/poklesu napětí.

9.7.1 Komunikační ústředna

Prvek ústředny (*Switchboard*) je prostředkem, který lze využít při řešení složitějšího algoritmu vnější komunikace mezi modely. Při sestavování simulací, kdy jednotlivé zdroje a agenti komunikují s více než jedním prvkem (např. simulace zaměřené na architekturu, různé struktury a funkce MAS) může vzniknout potřeba zakomponovat určitý algoritmus rozhodování nebo výběru na vstupu členu systému (VM nebo agenta). Vzhledem ke zvolené struktuře modelů by pak bylo neefektivní řešit tyto algoritmy, které mohou nabývat různých podob, přímo v rámci komunikačního modulu, v jeho vstupní úrovni. Proto byl vytvořen prvek ústředny, který usnadňuje uživateli práci se vstupními a výstupními daty jím vytvořeným algoritmem.

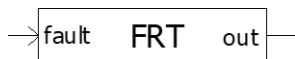


obr. 9-5: Architektura modelu komunikační ústředny

Výstupem modulu je jednak dvanáctielementový signál výstupu s označením *out com*, který je dále vstupem dálkové komunikace modelů VM a agentů. Ostatní jednorozměrové signály (*out 1* až *out 5*) mohou být uplatněni, jako výstupy vnitřních algoritmů modelu ústředny, ve vstupech prvků VM a agentů, prakticky jako kterákoliv proměnná v rámci nastavení jejich modulů.

9.7.2 Fault-ride-through

V rámci kapitoly 9.2.2.1 přílohy 4 PPDS, stejně tak jako dle RfG, jsou definovány určité mezní křivky definující schopnost VM překlenout poruchu. Těchto křivek je několik, pro různé typy a velikosti VM. Je výhodné mít přímo v rámci simulací nástroj/funkci, která by dokázala přímo do uživatelsky definovaného výstupu v podobě grafu integrovat zmíněné průběhy, pro snazší možnost vyhodnocení výstupu simulací.



obr. 9-6: Architektura modelu FRT

10 MODELÝ PRVKŮ SÍTÍ (ARCHITEKTURA, FUNKCE A NASTAVENÍ)

Tato kapitola má za cíl popis všech modelů a jejich modulů a funkcí s cílem kompletně zahrnout všechny informace a úvahy, které vedly ke konečnému řešení. Zároveň má sloužit jako souhrnný přehled a popis vytvořených modelů pro uživatele.

Stěžejní bodem této práce je model zdroje elektrické energie vytvořený v programu PSCAD. Výchozím požadavkem je dobrá využitelnost tohoto modelu při různých studiích. Neméně důležitými požadavky jsou aplikace komunikační vrstvy, uživatelsky srozumitelné rozhraní a variabilita modelu s ohledem na požadavky konkrétních simulací.

Všechny vytvořené modely a moduly jsou zahrnuty v **knihovně *Library_SG***, která je volnou přílohou této práce. V následující podkapitole je uveden její stručný popis, který zároveň představuje všechny vytvořené modely a moduly. Všechny modely obsažené v knihovně jsou pak popsány v samotných podkapitolách.

V rámci jednotlivých modulů, které tvoří výsledný model zdroje nebo agenta je použito totožné **rozložení grafického plátna** v rámci programu PSCAD. Popisu tohoto prostředí se věnuje opět samostatná podkapitola, která má za cíl představit zvolenou strukturu rozložení plátna.

Podkapitoly popisující samotné **modely a jejich moduly** obsahují konkrétní popis řešení požadovaných funkcí spolu s popisem vstupů, výstupů a dalších návazností tak, aby uvedené informace byly dostatečně kompletní pro pochopení a práci uživatele s modely. Návaznosti proměnných použitých parametrů je popsán v rámci popisu struktury modelu/modulu. Navíc, každý parametr kteréhokoliv vytvořeného prvku/modulu má stručnou nápovědu/popis i přímo v programu PSCAD. Text této nápovědy, a případně další informace, jsou vždy uvedeny v tabulce na konci kapitoly popisující daný modul/prvek/model.

Většina proměnných, které lze uživatelsky zadat je definována jako datový typ *variable* – viz kapitolu 6.5.1 (od strany 120). To bylo zvoleno z důvodu možnosti změny hodnoty parametru v průběhu simulace, což rozšiřuje možnosti využití modelů při různých studiích.

V popisu v rámci této kapitoly většinou nejsou uváděny jednotky nastavovaných a počítaných parametrů. Jejich popis zde je irelevantní vzhledem k tématu popisu. U každého parametru je jednotka vždy uvedena v uživatelském menu nastavení konkrétního parametru v programu PSCAD.

Knihovna modelů

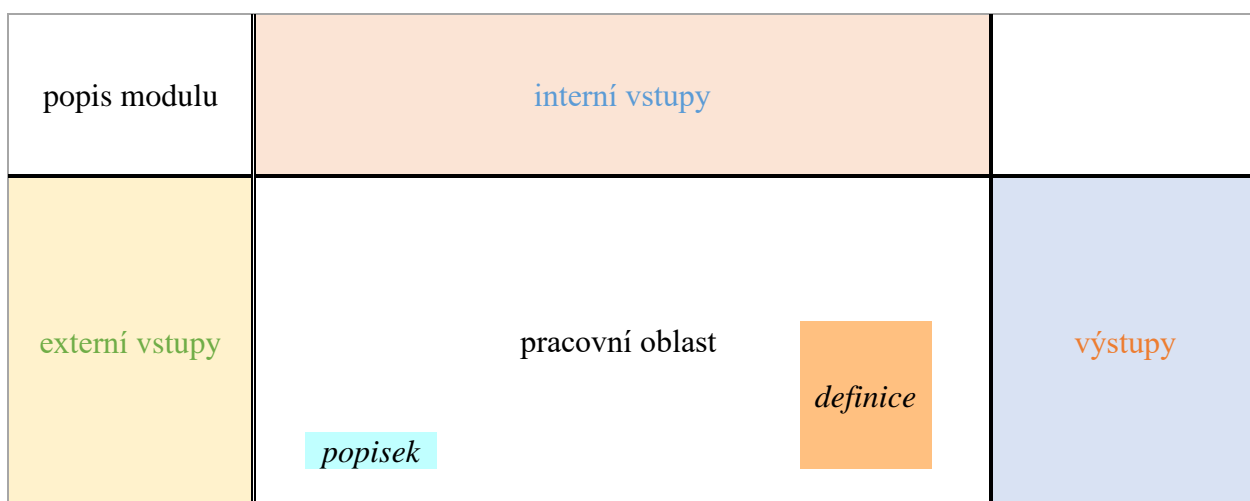
Všechny vytvořené modely prvků ES jsou uloženy v knihovně ***Library_SG.pslx***, která se součástí volných příloh této práce. Součástí knihovny jsou i odkazy na simulace konkrétních problematik uvedených v kapitole 11, které jsou součástí této práce.

U každého z více jak 350 parametrů použitých v rámci nastavení modelů a modulů je přímo v programu PSCAD uvedena nápověda. Tato nápověda/popis se prolíná s popisem, který je uveden v rámci této kapitoly.

Grafické rozložení plátna

Pro snazší orientaci a práci s moduly bylo přistoupeno k jednotnému schématu pracovního plátna schémat modulů v programu PSCAD. Zvolené rozložení pracovního plátna v prostředí programu PSCAD má určitou strukturu, která byla zvolena s cílem o dosažení co nejvyššího stupně

přehlednosti, pro snadnou orientaci ve schématu. Všechny moduly mají přesně danou obecnou strukturu. Cílem je uživatelská přehlednost a srozumitelnost aplikovaných schémat. Pracovní plátno je předěly rozděleno na šest oblastí. Jeho grafická podoba je na obr. 10-1. V oblasti **popis modulu** je vždy uveden stručný popis funkce daného modulu. V oblasti **interní vstupy** jsou ve sloupcích přivedeny signály, které jsou definovány v okně nastavení modulu. Každý sloupec, tvořený názvy signálů v oblasti interních vstupů, se postupně váže ke konkrétní záložce okna nastavení modulu. V oblasti **externí vstupy** jsou přivedeny signály, které mají původ v jiných modulech modelu. V oblasti **pracovní oblast** je definováno samotné schéma funkčního modulu, ve kterém jsou zahrnuty všechny algoritmy a funkce daného modulu. V pracovní oblasti jsou pro snazší orientaci a přehlednost vyznačeny **popisky** částí/celků schématu a **definice** vyskytující se v daném modulu. V oblasti **výstupy** jsou vyvedeny výstupní data modulu. Barevné rozlišení oblastí vstupů a výstupu na obr. 10-1 bylo provedeno s ohledem na přehlednost popisu jednotlivých modulů (viz barevné rozložení tabulek v následujících podkapitolách).



obr. 10-1: Rozvržení pracovního plátna modulů v programu PSCAD

V následujících podkapitolách kapitoly 10 jsou od sebe v textu vzájemně barevně odlišeny typy signálu ve smyslu jejich původu a návazností. Jsou tak od sebe odlišeny **externí vstupy** (signály z jiných modulů) nebo **signály získané z jiných návazností/funkcí** modulu, **interní vstupy**, které může uživatel definovat a **výstupy**, které se uplatní v dalších návaznostech systému.

Ve všech modulech vytvořených v rámci této práce jsou záměrně odstraněny všechny výstupní kanály, které by zobrazovaly aktuální hodnotu daného signálu/parametru nebo jeho průběh v čase. Výstupní kanály totiž do relativně velké míry ovlivňují výpočetní náročnost a tím i čas simulace. Možnost zobrazení požadovaných parametrů je v základní struktuře pojetí řešena prostřednictvím výstupních parametrů některých modulů, zpravidla modulů měření, ale i jiných. Uživatel může samozřejmě přivést na zobrazení kterýkoliv signál použitím prvku výstupu aplikovaného do pracovní oblasti daného plátna.

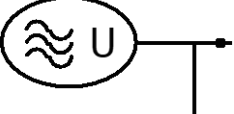

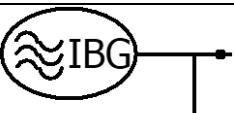

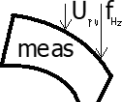





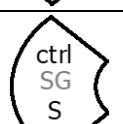
10.1 Zdroje


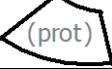
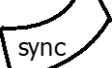
Stěžejním prvkem této práce jsou modely zdrojů elektrické energie. V návaznosti na předchozí kapitoly této práce byly voleny a realizovány funkce a možnosti nastavení modelů. Základní rozdělení respektuje možnosti uvedené v kapitole 3, tedy rozdělení na synchronní generátory (SG) a měničové zdroje (IBG). Tímto rozdělení lze postihnout majoritní podíl typů zdrojů. Respektuje se tím také základní rozdělení dle RfG a PPDS, a to rozdělení na SVM a NVM. Tyto dva základní

typy jsou doplněny modelem zdroje reprezentovaný tvrdým napětíovým zdrojem s příslušnou vnitřní impedancí.

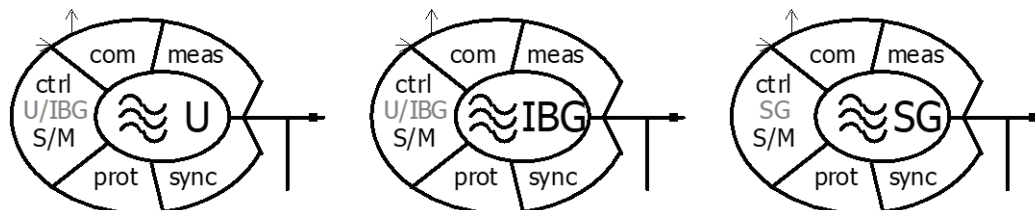
Modely zdrojů se skládají z několika modulů. Každý modul má v kompetenci určitou část celkové funkce. Jak už bylo zmíněno dříve, modulové uspořádání přináší přehlednost a snazší orientaci v celkové struktuře, popisu a možnostech nastavení funkčních celků. V tab. 10-1 jsou přehledně uvedeny základní návaznosti všech modulů použitých pro modely zdrojů. **Tyrkysové pozadí** ve sloupci typu zdroje v tab. 10-1 značí modul, který je u daného typu zdroje použit v základní struktuře.

tab. 10-1: Základní návaznosti modulů modelů zdrojů

grafika	název modulu	název definice	pro typ zdroje	popis na straně:
	Samotný zdroj – U	DG_main_U	U	164
	Samotný zdroj – SG	DG_main_SG	SG	165
	Samotný zdroj – IBG	DG_main_IBG	IBG	167
	Měření	DG_meas	U SG IBG	169
	Měření – testovací	DG_meas_test	U SG IBG	172
	Komunikace	DG_com	U SG IBG	174
	Výplňový komunikace	DG_com_blank	U SG IBG	226
	Řízení – IBG – M/S	DG_ctrl_IBG_MS	U IBG	176
	Řízení – IBG – S	DG_ctrl_IBG_S	U IBG	211
	Řízení – SG – M/S	DG_ctrl_SG_MS	SG	211
	Řízení – SG – S	DG_ctrl_SG_S	SG	215

	Ochrany	DG_prot	U SG IBG	215
	Výplňový komunikace	DG_prot_blank	U SG IBG	226
	Synchronizace	DG_sync	U SG IBG	223

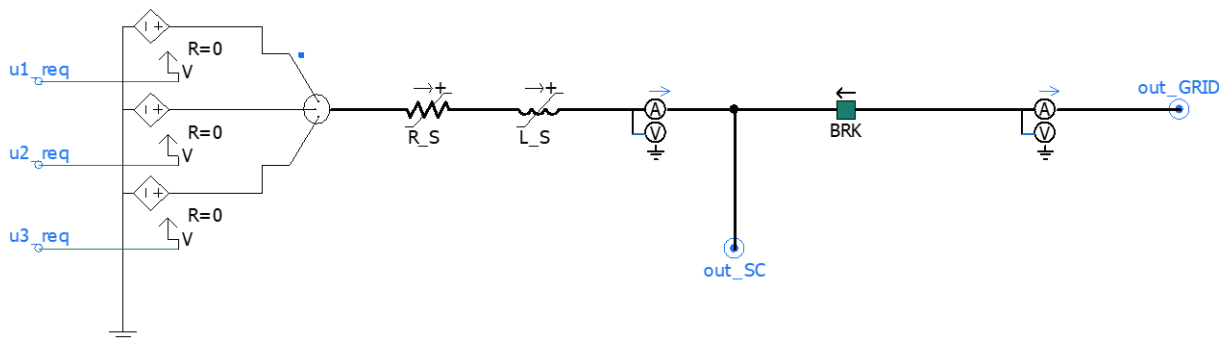
Struktura jednotlivých modelů zdrojů je uvedena na obr. 10-2.



obr. 10-2: Základní struktura modelu napěťového zdroje (U), měničového zdroje (IBG) a synchronního zdroje (SG)

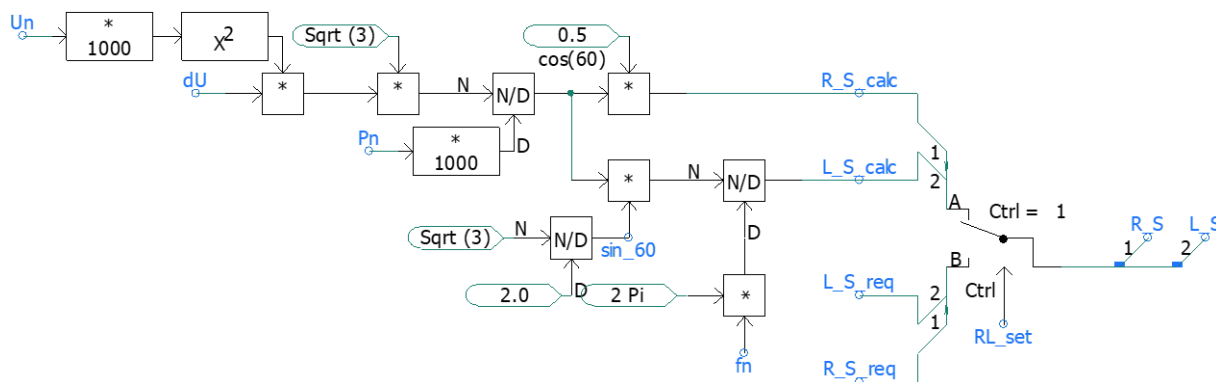
10.1.1 Samotný zdroj – U

Úloha modulu samotného zdroje tvořeného čistě ekvivalenty ideálních jednofázových napěťových zdrojů je generovat silový signál na základě vstupů z modulu řízení. Schéma silové části je zobrazeno na obr. 10-3. Model VM s tímto modulem samotného zdroje je vhodné použít pro load-flow studie, studie nastavení výkonových charakteristik apod. Výhodou je ze všech modelů VM nejnížší výpočetní náročnost.



obr. 10-3: Schéma silové části modulu samotného zdroje U

Externími vstupy jsou signály $u1_req$, $u2_req$, $u3_req$, které přicházejí z modulu řízení. Jedná se o požadovaný harmonický signál, který má mít výstupní silový obvod. Prvky napěťových zdrojů jsou tak modely ideálních stejnosměrných zdrojů. Aby byla vůbec možná regulace výkonu daného typu zdroje, musí být modelována impedance ideálních zdrojů napětí. Impedance je realizována prvky resistance a induktance. Jejich hodnoty, R_S a L_S , jsou dány buď volbou uživatele v rámci proměnných R_S_req a L_S_req nebo výstupem výpočtu s uživatelem nastavitelnou hodnotou poměrného úbytku napětí na impedanci – dU (s pevně nastaveným úhlem impedance – 60°). Volba je dána proměnnou RL_set na základě uživatelské volby. Dalšími signály pro možnost provedení výpočtu jsou jmenovité hodnoty napětí – Un , výkonu – Pn a frekvence – fn , které jsou základním nastavením definovány v modulu řízení. Algoritmus volby a výpočtu je uveden na obr. 10-4.



obr. 10-4: Algoritmus volby a výpočtu vnitřní impedance zdroje

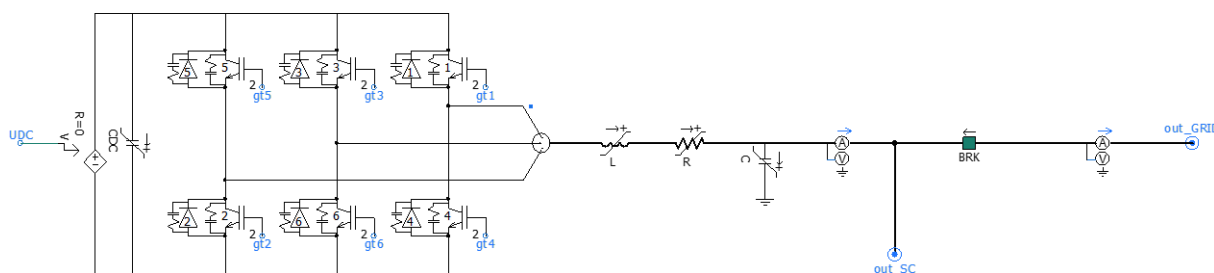
Pomocí prvků multimetrů jsou získávány potřebné informace pro funkci *modulu měření*. První multimetr zleva měří okamžité hodnoty fázových napětí – *measS_u* a okamžité hodnoty proudů fází – *measS_i* a fázový úhel napětí – *measS_Ph*. Ty, spolu s okamžitými hodnotami napětí druhého multimetru – *measG_u*, tvoří výstupy modulu pro *modul měření*. V celém popisu je pro dvojici měření – před a za zdrojovým vypínačem použito označení s indexem *S*, resp. *G*. Symbol *S* označuje stranu zdroje – *Source*, symbol *G* označuje stranu sítě – *Grid*. (Nezaměňovat s označením *S* jako síť a *G* jako generátor!) Mezi multimetry je prvek výkonového vypínače, který je ovládán signálem *BRK* přicházejícím z *modulu synchronizace*. Výstup *out_SC* je silovým výstupem pro připojení vlastní spotřeby a výstup *out_GRID* je silovým výstupem pro připojení k vnější síti (obě napojení vně modelu).

Uživatelské nastavení je realizováno:

- v (1.) záložce *Configuration*,
 - skupině *General*,
 - parametr *Name* (– hodnota aplikována do grafiky modulu),
 - parametr *RL set chooice* – *RL_set*,
 - parametr *R* – *R_S_req*,
 - parametr *L* – *L_S_req*,
 - parametr *Output voltage drop* – *dU*.

10.1.2 Samotný zdroj – IBG

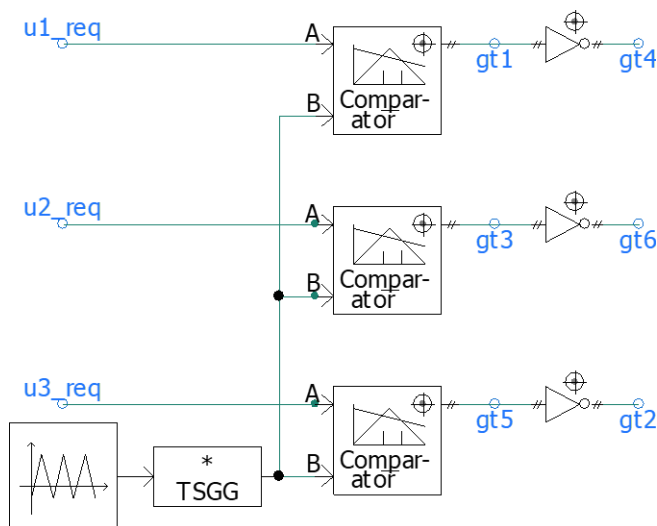
Model IBG je řešen jako semi-full model. Kombinuje v sobě vlastnosti reálné funkce 3f střídače, který je modelován samotnými spínanými prvky a vlastnosti ideálního napěťového zdroje, pomocí kterého lze snadno simulovat vlastnosti stejnosměrného meziobvodu. Výhodou takového modelu je výsledné odpovídající chování střídače a tím i tvar a odezva výstupního signálu měniče, a zároveň snadná integrace řídicích signálů. S úvahou nad účelem modelů bylo zvoleno takové řešení, které neřeší kapacitu primárního zdroje energie. Ta je nahrazena právě ekvivalentem napěťového zdroje, který definuje napětí stejnosměrného meziobvodu IBG. To přináší kromě úspory množství balastního nastavování dalších parametrů modelu zdroje i úsporu výpočetního času simulace. Daný model tak nalezne uplatnění ve všech studiích řešících chování IBG v síti, včetně úloh zahrnující studium dopadu nastavení měniče na výstupní harmonický signál, studium harmonického spektra výstupního signálu atd. Schéma silové části modelu samotného zdroje IBG je zobrazen na obr. 10-5.



obr. 10-5: Schéma silové části modulu samotného zdroje IBG

Stejnoseměrný obvod modelu IBG tvoří napěťový zdroj, jehož velikost napětí a tím reprezentovaný zdroj primární energie, je dán signálem *UDC*, který je uživatelskou volbou, stejně jako velikost kapacity kondenzátoru stejnosměrného obvodu – *CDC*. Spínací povely *gt1* až *gt6* pro prvky IGBT, které tvoří spolu s paralelně připojenými diodami element trojfázového střídače jsou generovány v signálové části modulu samotného zdroje IBG. Silový výstup střídače je veden skrze prvky RLC, jejichž velikosti lze uživatelsky nastavit pomocí proměnných *R*, *L* a *C* a definovat tak parametry výstupního filtru střídače na prvek výkonového vypínače, který spojuje zdroj vč. zátěže připojené ve vlastní spotřebě – *out_SC*, se sítí, do které je VM připojen – *out_GRID*. Pomocí prvků multimetrů jsou získávány potřebné informace pro funkci *modulu měření*. Oba multimetry mají stejný účel jako v modelu samostatného zdroje U popsaného v předchozí kapitole. Výstupy multimetrů tak jsou opět signály *measS_u*, *measS_i*, *measS_Ph* a *measG_u*. Stejně tak poloha vypínače je ovládána signálem *BRK* přicházejícím z *modulu synchronizace*.

Signálová část modulu zajišťuje generování spínacích pulzů tranzistorů a jeho schéma je uvedeno na obr. 10-6.



obr. 10-6: Schéma algoritmu generování spínacích pulzů střídače

Externími vstupy jsou signály *u1_req*, *u2_req*, *u3_req*, které přicházejí z *modulu řízení*. Jedná se o požadovaný harmonický signál, který má mít výstupní silový obvod. Tyto signály jsou v komparátoru porovnávány s pilovým signálem o frekvenci zvolenou uživatelem skrze proměnnou *FoS* a o velikosti definované uživatelsky nastavitelnou proměnnou *TSGG*. Následuje distribuce signálů pro jednotlivé proměnné spínacích povelů *gt1* až *gt6* pro prvky IGBT v silové části modelu. U prvku komparátoru a logického inverteru a následně i u prvku IGBT je použita funkcionality *interpoláční kompatibility*, která je popsána v rámci kapitoly 6.1, konkrétně na straně 115. Zpřesňuje se tak nezanedbatelně výstup měniče a tím i samotný výpočet simulace.

Uživatelské nastavení je realizováno:

- v (1.) záložce *Configuration*,
 - skupině *General*,
 - parametr *Name* (– hodnota aplikována do grafiky modulu),
 - skupině *Inverter parameters*,
 - parametr *DC voltage* – *UDC*,
 - parametr *DC capacitance* – *CDC*,
 - parametr *Triangle signal generator gain* – *TSGG*,
 - parametr *Frequency of signal generator* – *FoS*,
 - skupině *Output parameters*,
 - parametr *Output resistance* – *R*,
 - parametr *Output inductance* – *L*,
 - parametr *Output capacitance* – *C*.

10.1.3 Samotný zdroj – SG

Model synchronního zdroje je řešen přímo modelem synchronního stroje (prvek *Synchronous Machine*) ze základní knihovny programu PSCAD. Jedná se o full model synchronního stroje s možnostmi nastavení široké škály parametrů definujících jeho vlastnosti. Nastavení parametrů synchronního generátoru je ponecháno čistě na uživatelských volbách a nastavení. Realizace postulovaného modelu synchronního VM je zaměřena na snadné zakomponování modelu do pracovního projektu a specializuje se zejména řídicí obvody, které jsou popsány v příslušném popisu řízení v rámci kapitoly 10.1.9.

Spolu se samotným synchronním strojem je důležitou komponentou budící soustava. Pro tu je opět použit prvek (prvek *Type AC Exciter*) ze základní knihovny programu PSCAD, jehož možností nastavení je i volba typu budiče dle rozčlenění standartu IEEE, jejichž přenosové funkce, které jsou aplikovány v modelu, jsou popsány přímo v nápovědě programu PSCAD (pod heslem *AC Exciter Transfer Functions*) nebo, podrobněji, přímo v daném standartu IEEE [128].

Mimo oblast řízení je model samotného zdroje SG osazen ještě reprezentací přenosových funkcí regulačního ventilu turbíny a turbíny samotné. Na obr. 10-7 je zobrazeno schéma daného modulu.

vložit ji do definic daného projektu, přejmenovat definici (k čemuž bude uživatel vyzván programem), a následně vytvořit instanci z nové definice modulu samotného zdroje SG.

Stejně jako u dvou předchozích *modulů samotných zdrojů*, jsou výstupy multimetrů opět signály *measS_u*, *measS_i*, *measS_Ph* a *measG_u*. Stejně tak poloha vypínače je ovládána signálem *BRK* přicházejícím z *modulu synchronizace*. Výstup *out_SC* je silovým výstupem pro připojení vlastní spotřeby a výstup *out_GRID* je silovým výstupem pro připojení k vnější síti.

Uživatelské nastavení je realizováno:

- v (1.) záložce *Configuration*,
 - skupině *General*,
 - parametr *Name* (– hodnota aplikována do grafiky modulu),
 - skupině *Turbine*,
 - parametr *Turbine gain* – *t_G*,
 - parametr *Turbine time constant* – *t_TI*,
 - parametr *Min. output limit* – *t_min*,
 - parametr *Max. output limit* – *t_max*,
 - skupině *Valve*,
 - parametr *Valve gain* – *v_G*,
 - parametr *Valve time constant* – *v_TI*.

10.1.4 Měření

Modul měření zajišťuje zpracování měření okamžitých hodnot napětí před a za vývodovým vypínačem a okamžité hodnoty proudu zdroje. Na základě těchto veličin dopočítává další parametry, které jsou důležité pro řízení zdroje, funkce ochran a funkce modulu synchronizace pro přifázování zdroje k síti. Mimo jiné také poskytuje uživateli přehled o elektrických parametrech zdroje. Důležitou vlastností tohoto modulu je přepočet skutečných hodnot na poměrné. Z toho důvodu patří mezi externí vstupy nominální hodnoty napětí, frekvence a výkonu zdroje z modulu řízení. Motivace pro využití poměrných jednotek je ukryta v modulu řízení. Použití poměrných jednotek do značné míry zjednodušuje uživateli problematiku nastavení časových a integračních konstant použitých regulačních obvodů. Podobně je tomu u modulu ochran, kdy poměrné jednotky usnadňují nastavování ochranných funkcí.

V následujícím popisu je pro dvojici měření – před a za zdrojovým vypínačem použito označení s indexem *S*, resp. *G*. Symbol *S* označuje stranu zdroje – *Source*, symbol *G* označuje stranu sítě – *Grid*. (Nezaměňovat s označením *S* jako síť a *G* jako generátor!)

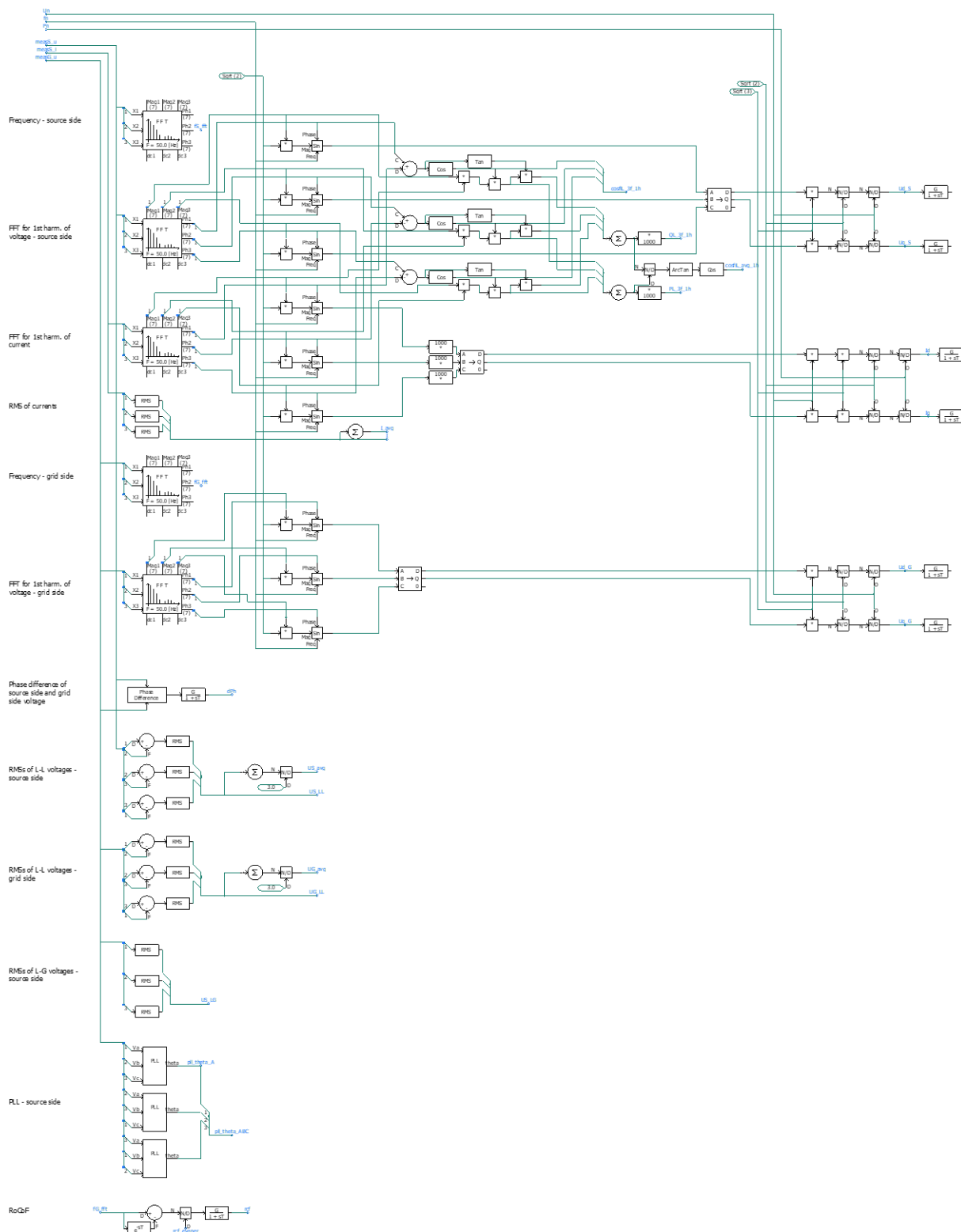
Dle ČSN EN 50438 [51] lze pro vyhodnocení napětí pro PQU regulaci použít buď souslednou složku symetrických složek, nebo průměrné napětí v trojfázové soustavě, anebo závislé na napětí v každé fázi pro stanovení jalového výkonu pro jednotlivou fázi. Pro vlastnost modulu měření a jeho následné využití byla zvolena prostřední možnost – průměrné napětí v trojfázové soustavě.

Pro měření frekvence byl v modulu měření použit prvek *On-Line Frequency Scanner* z důvodů popsanych v kapitole 6.6.2.

Finální struktura modulu měření byla realizována s ohledem na přehlednost a možnost případných dalších úprav. Požadavky na zpracování signálu totiž mohou být různé. V rámci této práce bylo zvoleno řešení, které je optimální pro potřeby daných simulací s ohledem na požadovanou přesnost a správnost v rámci simulačního prostředí programu PSCAD. Vždy je totiž důležité mít na mysli, že simulace je pouze výpočet určité soustavy rovnic, které jsou řešeny

v časové oblasti s určitým časovým krokem. Některé procesy v rámci zpracování a výpočtů jsou v simulačním prostředí odlišné od reálných procesů. Tato úvaha byla brána v potaz během celého návrhu a realizace modulu měření.

V následujících odstavcích této podkapitoly jsou popisovány jednotlivé sekce modulu měření s ohledem na efektivní přehlednost a snadnost pochopení pro uživatele. Celkové schéma pracovní oblasti modulu měření je uveden na obr. 10-8.



obr. 10-8: Schéma modulu měření VM

Pro určení frekvence na straně zdroje byl použit prvek *On-Line Frequency Scanner*, který je součástí hlavní knihovny. Rozvaha o použití tohoto prvku namísto prvku *Frequency/Phase/RMS Meter* je uvedena v kapitole 6.6.2. Vstupním signálem prvku *On-Line Frequency Scanner* je trojrozměrový externí signál *measS_U*, který reprezentuje měření okamžitého průběhu fázových napětí na straně zdroje. Prvek *On-Line Frequency Scanner* je nastaven pro výpočet frekvence ze sedmi harmonických složek. Výstupem prvku je signál *fS_fft*, který je součástí výstupní matice signálu modulu měření.

FFT pro první harmonickou napětí na straně zdroje spolu s FFT pro první harmonickou proudou byly získány skrze prvek *On-Line Frequency Scanner* pro určení činného a jalového výkonu a účinníku dle algoritmu pro jejich výpočet, který je zřejmý z obr. 10-8. Výstupy tak jsou signál činného výkonu *PL_3f_1h*, jalového výkonu *QL_3f_1h*, účinníku *cosfiL_avg_1h* a účinníku *cosfiL_3f_1h*. Dále jsou hodnoty prvních harmonických použity pro určení daného napětí, resp. proudu v *dq* souřadnicovém systému – *Ud_S* a *Uq_S*, resp. *Id* a *Iq* pomocí prvků *abc to dq0 transformation*. Tyto parametry jsou důležité v návaznosti na regulační algoritmy řízení měničových zdrojů. Pro stabilitu signálu lze skrze uživatelsky nastavitelnou proměnnou definovat časové konstanty prvku *real pole* – *TC_Ud_S*, *TC_Uq_S*, *TC_Id* a *TC_Iq*.

Efektivní hodnoty proudů pro získání efektivních hodnot proudů jednotlivých fází – *I* a jejich průměrné hodnoty *I_avg* jsou získávány pomocí prvku *Single-Phase RMS Meter*. Ten je nastaven pro základní harmonickou frekvenci 50 Hz a 256 vzorků za periodu základní frekvence. Toto nastavení je použito pro všechny použité prvky *Single-Phase RMS Meter* napříč moduly a modely. Takové nastavení, které odpovídá vzorkovací frekvenci 12,8 kHz, je dostatečné v kontextu voleného výpočetního kroku simulace, který bývá pro studium v oblasti kvality elektrické energie obvykle mezi 10 a 50 μ s.

Pro určení frekvence na straně sítě byl zvolen stejný přístup jako při určení frekvence na straně zdroje. Vstupem je zde ale signál *measG_U*, který reprezentuje měření okamžitého průběhu fázových napětí na straně sítě a výstupem prvku je signál *fG_fft*.

FFT pro první harmonickou napětí na straně sítě je řešeno stejně jako u strany zdroje. Výstupem následného algoritmu jsou hodnoty napětí v *dq* souřadnicovém systému – *Ud_G* a *Uq_G*. Pomocí proměnných *TC_Ud_G* a *TC_Uq_G* lze definovat časové konstanty prvku *real pole*.

Fázový rozdíl napětí na straně zdroje a na straně sítě – *dPh* je určen pomocí prvku *Phase Difference*, jehož výstupu lze uživatelsky nastavit hodnotu časové konstanty skrze prvek *real pole* – *TC_PhDif*.

Pro určení efektivních hodnot sdružených napětí na straně zdroje, efektivních hodnot sdružených napětí na straně zdroje a efektivních hodnot fázových napětí na straně zdroje je opět použito prvků *Single-Phase RMS Meter*. Výstupem jsou signály příslušných parametrů – *US_avg*, *US_LL*, *US_avg*, *US_LL* a *US_LG*.

Pro možnost generování požadovaného napětového signálu v rámci řídicí smyčky řízení napětového zdroje nebo IBG je nutné získat okamžitou hodnotu úhlu referenčního signálu. K tomu slouží algoritmus fázového závěsu strany zdroje. Využity jsou prvky *Phase Locked Loop (PLL)*, jejichž výstupem je signál s okamžitou hodnotou fázového úhlu napětí dané fáze napětí na straně zdroje v rozsahu 0 až 2π . Proporcionální zesílení prvku fázového závěsu lze definovat skrze uživatelské rozhraní modulu měření v rámci proměnné *PG*, stejně jako jeho integrační zesílení – *IG*. Výstupní signál *pll_theta_A* je uplatněn jako transformační úhel v prvcích *abc to dq0*

Transformation při získávání hodnot napětí a proudů v dq souřadnicovém systému v tomto modulu. Výstupní signál *pll_theta_ABC* reprezentující okamžitý úhel napětí všech fází je uplatněn v *modulu řízení IBG*.

Posledním dílčím algoritmem modulu měření VM je *rychlost změny frekvence* – RoCoF. Ta je určována z frekvence na straně sítě (fG_fft). Pro požadovaný výpočet je nutné uživatelsky definovat velikost časového okna pro výpočet rychlosti změny frekvence – *rcf_evaper*. Obvykle bývá voleno v rozsahu 2 až 40 period, což odpovídá času 0,04 až 0,80 sekund. Další nastavovaným parametrem je *rcf_Fgain*, resp. *rcf_Ftimecons* reprezentující hodnotu zesílení filtru, resp. časovou konstanta filtru. Výstupní signál *rcf* nachází uplatnění v modulu řízení IBG v rámci algoritmu umělé setrvačnosti. RoCoF pro funkce ochranných systémů je počítána přímo v *modulu ochran* pro možnost vlastního časového okna a parametrů signálového filtru.

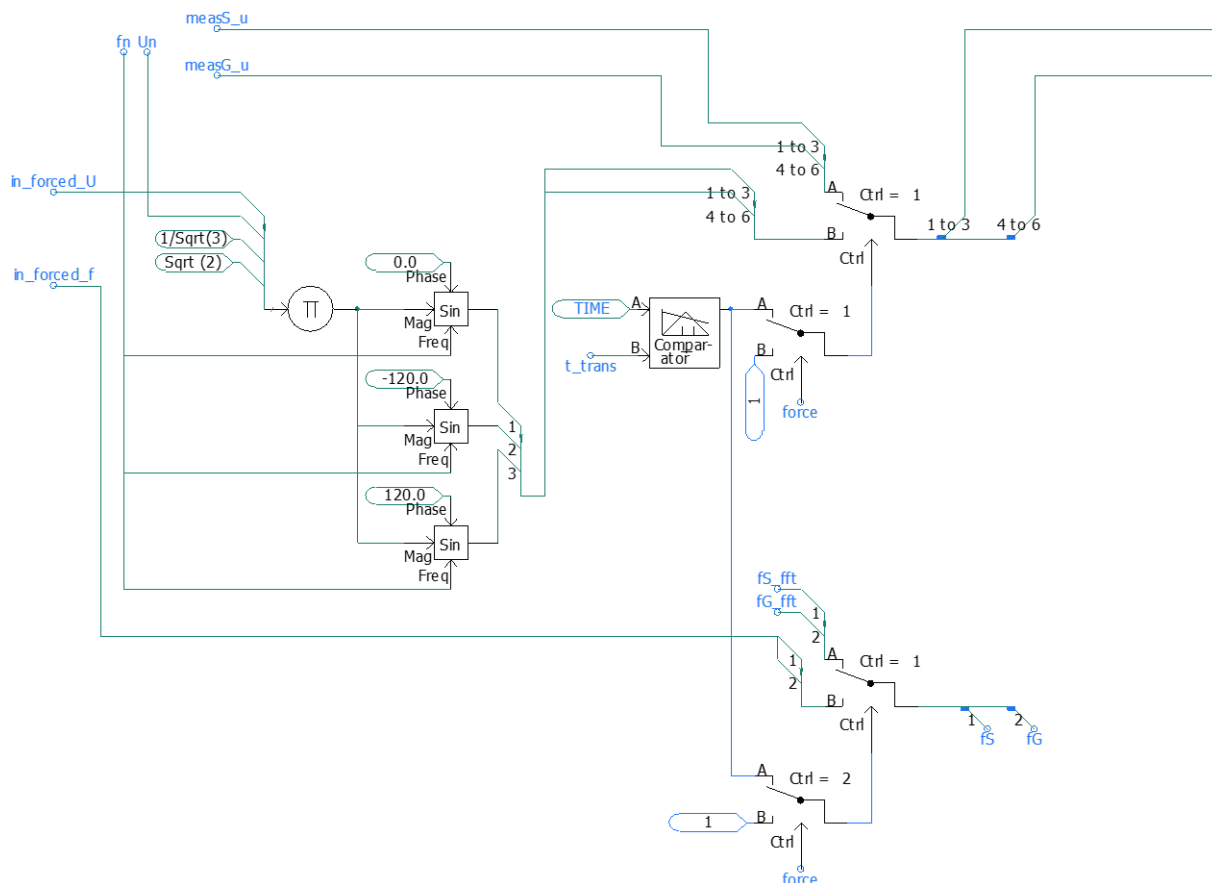
Uživatelské nastavení je realizováno:

- v (1.) záložce *Configuration*,
 - skupině *PLL*,
 - parametr *PLL proportional gain* – *PG*,
 - parametr *PLL integral gain* – *IG*,
 - skupině *RoCoF*,
 - parametr *Evaluation period* – *rcf_evaper*,
 - parametr *Filter gain* – *rcf_Fgain*,
 - parametr *Filter time constant* – *rcf_Ftimecons*,
 - skupině *Transfer functions*,
 - parametr *Time constant Ud_source* – *TC_Ud_S*,
 - parametr *Time constant Uq_source* – *TC_Uq_S*,
 - parametr *Time constant Id* – *TC_Id*,
 - parametr *Time constant Iq* – *TC_Iq*,
 - parametr *Time constant Ud_grid* – *TC_Ud_G*,
 - parametr *Time constant Uq_grid* – *TC_Uq_G*,
 - parametr *Time constant phase difference* – *TC_PhDif*.

10.1.5 Měření – testovací

S odkazem na metodiku ověření souladu s RfG [1], která je použita a diskutována v této práci, vznikl modul měření, který se od standardního modulu měření popsaného v předchozí kapitole 10.1.4 liší možností zavedení pevného externího signálu pro možnosti testování VM. Tím lze provést například simulaci změny hodnoty napětí v místě připojení dle příslušné FRT křivky.

Testovací modul se od klasického liší pouze nadstavbou v podobě znázorněné na obr. 10-9.



obr. 10-9: Schéma nadstavbové části testovacího modulu měření VM

Externí vstupní signál *in_forced_U* reprezentuje hodnotu napětí v poměrných jednotkách, která má být dále zpracovávána v modulu měření. A protože modul měření pracuje s okamžitým průběhem napětí a proudů, je nutné signál *in_forced_U* vynásobit jmenovitou hodnotou napětí (*Un*) a podílem $\sqrt{2}/\sqrt{3}$ – pro získání hodnoty amplitudy, a dále z této hodnoty vytvořit sinusový průběh o nominální frekvenci (*fn*) ve všech třech fázích systému – pootočení (fáze) 0, -120° a 120°. Tento signál pak v uživatelem definovaném čase *t_trans* nahradí původní měření v místě připojení zdroje (*measS_u* na straně zdroje (před vypínačem), resp. *measG_u* na straně sítě (za vypínačem)). Podobně jsou ve spodní části schématu řešeny náhrady signálů z měření frekvence (*fs_fft* a *fg_fft*) signálem *in_forced_f*, který je externím vstupem reprezentující hodnotu frekvence v jednotkách Hz. Předpoklad je, že vypínač zdroje je sepnut a systém pracuje v ustáleném²¹ stavu, což je logicky i podmínka pro testování pomocí simulace schopnosti překlenout poruchu, pro který tento modul primárně vzniknul. Signál *force* je uživatelskou volbou toho, jaký signál má být (od daného času *t_trans*) nahrazen signálem externího vstupu. Volby signálu *force* jsou „none“, „Voltage“ a „Frequency“.

Uživatelské nastavení je realizováno:

- v (1.) záložce *Configuration*,
 - skupině *General*,
 - parametr *Forced signal* – *force*,
 - parametr *Time of transition* – *t_trans*.

²¹ Ustáleném, ve smyslu, že nedochází ke změně parametrů napětí a činného a jalového výkonu – práce zdroje ve stanoveném pracovním bodě).

Ostatní uživatelská nastavení jsou stejná jako u standartního modulu měření popsaného v kapitole 10.1.4.

10.1.6 Komunikace

Modul komunikace zajišťuje návaznosti v rámci funkce F21 – Vnější komunikace modelu zdroje. Funkci lze rozdělit na dvě části. První část zpracovává signály vstupující do modelu VM a druhá část zajišťuje výstupní informace a jejich formát.

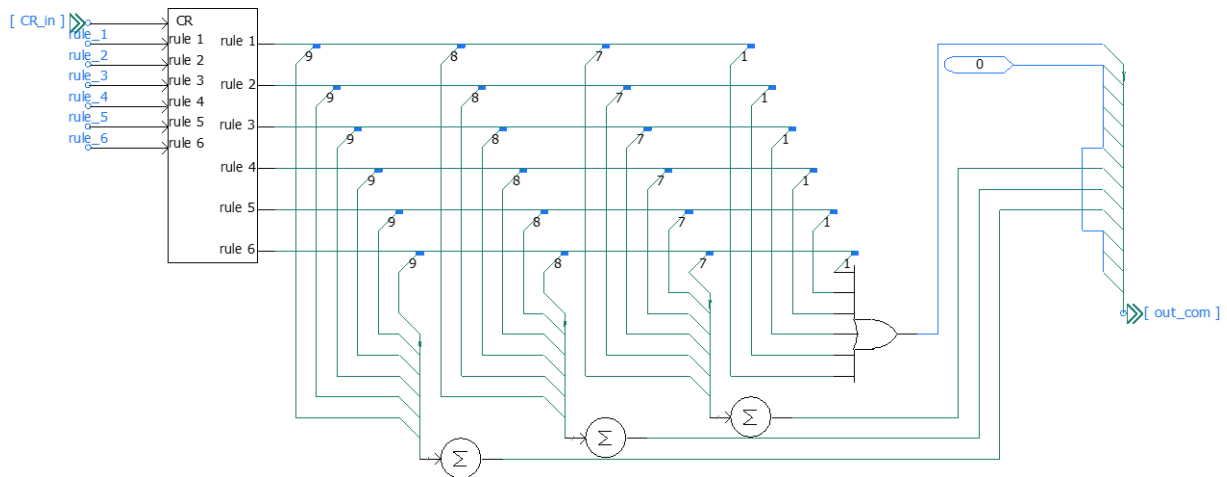
F21 – Vnější komunikace

Pro možnosti komunikace byl zvolen formát s dvanácti kanály a skladbou, která zajišťuje a definuje rozsah možností práce v rámci přímé komunikace mezi modely. Tvorba formátu předávaných informací byla řešena na základě potřeby konkrétního rozsahu informací předávaných mezi modely. Základní dvě entity uvažované pro výměnu informací jsou modely VM a model agenta. Navíc jsou komunikovány některé signály, které lze využívat v dalších nadstavbách inteligence MAS. V tab. 10-2 je uveden formát vstupních a výstupních informací modelu VM spolu s určením pozice a popisem signálu.

tab. 10-2: Externí vstupní a výstupní signály modelu VM

typ	pozice	signál	popis
Vstupní	1	<i>rule_BRK</i>	Pozice vypínače agenta nebo agentů definovaných pro vnější komunikace.
	2-6	0	
	7	<i>du</i>	Rozdíl velikostí napětí definované dálkové komunikace.
	8	<i>dPh</i>	Rozdíl fází napětí definované dálkové komunikace.
	9	<i>df</i>	Rozdíl velikostí frekvence definované dálkové komunikace.
	10-12	0	
Výstupní	1	<i>BRK</i>	Poloha vypínače VM.
	2	<i>P</i>	Velikost činného výkonu VM.
	3	<i>Q</i>	Velikost jalového výkonu VM.
	4	<i>US</i>	Aktuální průměrná hodnota sdružených napětí VM na straně zdroje.
	5	<i>UG</i>	Aktuální průměrná hodnota sdružených napětí VM měřená za vypínačem.
	6	<i>I</i>	Aktuální průměrná hodnota proudů jednotlivých fází.
	7-9	0	
	10	<i>block_rec</i>	Blokáda sepnutí vypínače komunikovaného agenta.
	11	<i>ctrlmode</i>	Regulační režim VM.
	12	0	

Vstupem modulu je signál dálkové komunikace – *CR_in*, který má rozměr celkem 144 polí – 12×12 . Tato velikost byla zvolena s ohledem na dostatečnou robustnost objemu prvků, které mezi sebou mohou komunikovat. Jinými slovy, model VM a model agenta může přijímat informace maximálně od dvanácti dalších entit v rámci dálkové komunikace. Tzv. pravidlo, podle kterého se bude daný VM řídit je definováno v rámci uživatelského rozhraní modulu komunikace proměnnou *rule_1* až *rule_6*. Tyto signály vstupují do definice *DG_com_ruler*. Výběr vstupů z dálkové komunikace je zobrazeno na obr. 10-10.



obr. 10-10: Schéma funkce F21, část vstupů

definice DG_com_ruler

Tato definice má za úkol na základě volby požadované skupiny komunikačního signálu vyčlenit právě tyto požadované signály na své výstupy.

Zdrojový kód definice *DG_com_ruler*:

```
#INCLUDE 's1.h'

IF ($input_1 == 1) THEN
    $output_1(1:12) = $input(1:12)
    ELSEIF ($input_1 == 2) THEN
        $output_1(1:12) = $input(13:24)
    ELSEIF ($input_1 == 3) THEN
        $output_1(1:12) = $input(25:36)
    ELSEIF ($input_1 == 4) THEN
        $output_1(1:12) = $input(37:48)
    ELSEIF ($input_1 == 5) THEN
        $output_1(1:12) = $input(49:60)
    ELSEIF ($input_1 == 6) THEN
        $output_1(1:12) = $input(61:72)
    ELSEIF ($input_1 == 7) THEN
        $output_1(1:12) = $input(73:84)
    ELSEIF ($input_1 == 8) THEN
        $output_1(1:12) = $input(85:96)
    ELSEIF ($input_1 == 9) THEN
        $output_1(1:12) = $input(97:108)
    ELSEIF ($input_1 == 10) THEN
        $output_1(1:12) = $input(109:120)
    ELSEIF ($input_1 == 11) THEN
        $output_1(1:12) = $input(121:132)
    ELSEIF ($input_1 == 12) THEN
        $output_1(1:12) = $input(133:144)
    ENDIF

IF ($input_2 == 1) THEN
    $output_2(1:12) = $input(1:12)
    ELSEIF ($input_2 == 2) THEN
        $output_2(1:12) = $input(13:24)
    ELSEIF ($input_2 == 3) THEN
        $output_2(1:12) = $input(25:36)
    ELSEIF ($input_2 == 4) THEN
        $output_2(1:12) = $input(37:48)
    ELSEIF ($input_2 == 5) THEN
        $output_2(1:12) = $input(49:60)
    ELSEIF ($input_2 == 6) THEN
        $output_2(1:12) = $input(61:72)
    ELSEIF ($input_2 == 7) THEN
        $output_2(1:12) = $input(73:84)
    ELSEIF ($input_2 == 8) THEN
        $output_2(1:12) = $input(85:96)
    ELSEIF ($input_2 == 9) THEN
        $output_2(1:12) = $input(97:108)
    ELSEIF ($input_2 == 10) THEN
        $output_2(1:12) = $input(109:120)
    ELSEIF ($input_2 == 11) THEN
        $output_2(1:12) = $input(121:132)
    ELSEIF ($input_2 == 12) THEN
        $output_2(1:12) = $input(133:144)
    ENDIF

IF ($input_3 == 1) THEN
    .
    .
    .
ENDIF

IF ($input_4 == 1) THEN
    .
    .
    .
ENDIF

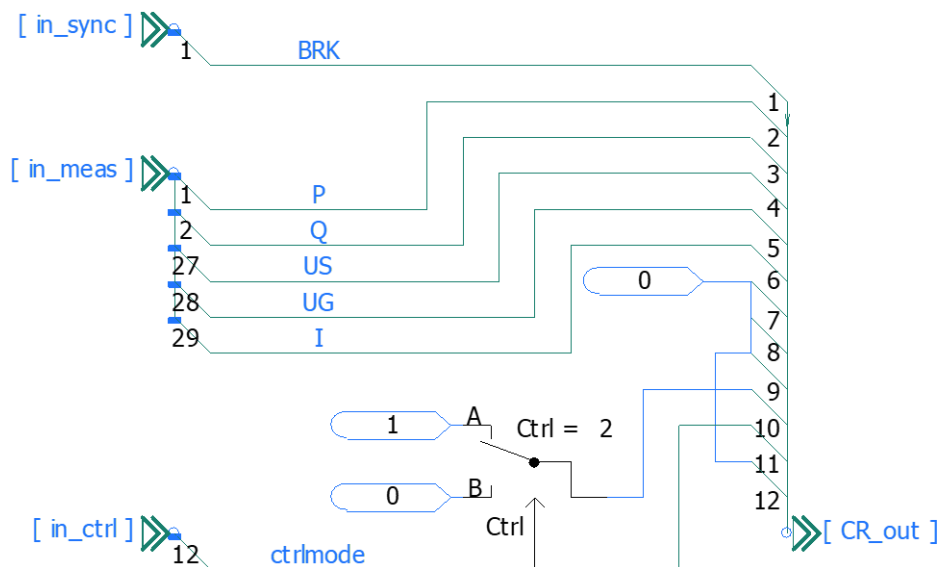
IF ($input_5 == 1) THEN
    .
    .
    .
ENDIF

IF ($input_6 == 1) THEN
    .
    .
    .
ENDIF
```

Výstup signálů *rule_BRK* (pozice 1) pak vstupuje na člen logického součinu. Změna hodnoty tohoto signálu má návaznost v modulu řízení, ve funkci F03 – Určení regulačního módu. Výstupy

signálů *du*, *dPh*, *df* (pozice 7, 8 a 9) jsou vedeny vstup prvku součtu, jehož výstup se uplatní v algoritmu řízení v regulačním módu 3 (*ctrlmode* = 3), který slouží k přiřazování ostrova zpět k soustavě, a který je popsán v rámci funkcí F05 – Regulační obvod řízení IBG - master – obvod napětí a F06 – Regulační obvod řízení IBG - master – obvod frekvence.

Schéma, pomocí kterého se formuje výstupní signál modulu komunikace VM pro vnější komunikaci – *CR_out*, je zobrazeno na obr. 10-11.



obr. 10-11: Schéma funkce F21, část výstupů

Signály vstupující do schématu řazení jsou popsány v předchozí tabulce. Signál blokady na pozici 10 – *block_rec*, který v příslušném agentu/agentech blokuje možnost sepnutí vypínače nabývá hodnoty 1 v případě, že *ctrlmode* = 2. Jinými slovy v případě, kdy je regulační režim řízení VM ve stavu regulace ostrovního provozu (*ctrlmode* = 2). Je totiž nežádoucí, aby existovala možnost automatického sepnutí vypínače agenta při náhodném splnění fázovacích podmínek. Blokáda je zrušena až v případě vstupu VM do režimu řízení 3 (*ctrlmode* = 3) – režimu znovupřipojení ostrova k síti.

Takto vzniklý výstupní signál *CR_out* opouští modul komunikace v podobě externího signálu.

Uživatelské nastavení modulu komunikace je realizováno:

- v (1.) záložce *Configuration*,
 - skupině *Rules*,
 - parametr *No. of rule to listen* – *rule_1*,
 - parametr *No. of rule to listen* – *rule_2*,
 - parametr *No. of rule to listen* – *rule_3*,
 - parametr *No. of rule to listen* – *rule_4*,
 - parametr *No. of rule to listen* – *rule_5*,
 - parametr *No. of rule to listen* – *rule_6*.

10.1.7 Řízení – IBG – M/S

Pohled na problematiku řízení zdrojů uvedený v kapitole 3.3 je výhodný z pohledu modelování řídicích smyček zdrojů. Filozofie vycházející z uvedeného popisu je uplatněná i v rámci konstrukce modelů. Modul řízení tvoří rozsáhlý systém s mnoha návaznostmi a možnostmi nastavení. Popis tohoto modulu je proto rozdělen na popis jednotlivých funkčních celků modulu.

Cílem modulu řízení je vytvořit takový výstupní signál, který se uplatní v návaznostech *samotného zdroje* a bude pomocí něho dosaženo žádaných parametrů VM. Výstupem modulu řízení IBG je referenční signál požadovaných průběhů fázových napětí, které jsou funkcí *modulu samotného zdroje U* nebo *modulu samotného zdroje IBG* použity pro generování silového výstupního signálu VM. (Pro *modul samotného zdroje SG* jsou výstupem jeho *modulu řízení SG* signály reference napětí budiče a mechanického točivého momentu.)

Nastavení modulu zdroje umožňuje uživateli definovat vlastnosti modelu zdroje. Jak již bylo uvedeno v kapitole 3, různé zdroje elektrické energie mají různé vlastnosti s ohledem na pracovní oblast, ve které mohou pracovat – P-Q diagram. Tato vlastnost se váže ke konkrétním typu generátoru, a proto ji lze v tomto modulu definovat. Při použití napěťového nebo invertorového zdroje je nastavení P-Q diagramu zdroje zcela v rukou uživatele. Nastavení modulu zdroje tak definuje možnou pracovní oblast. To, jaký výkon bude zdroj konkrétně do sítě při simulaci dodávat, definuje nastavení chování zdroje právě v modulu řízení.

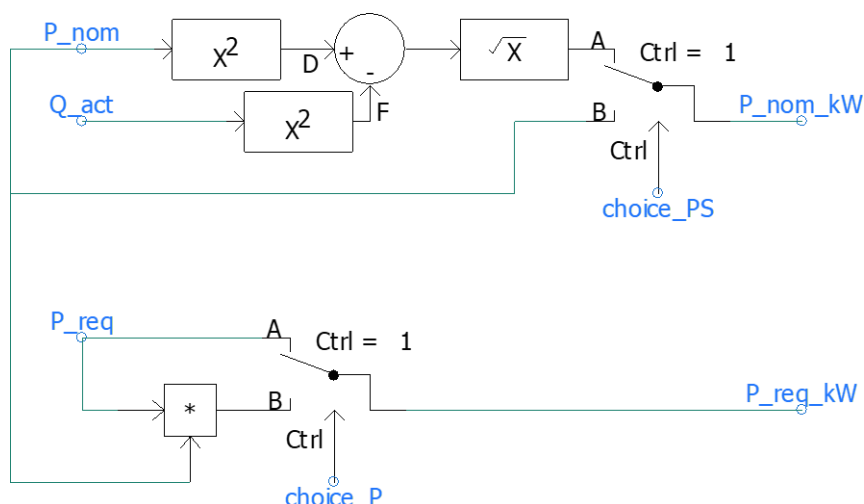
Vlastností zdroje v elektrizační soustavě je také jeho chování v závislosti na ostatních parametrech v síti a s ohledem na synchronně pracující soustavu. V nejobecnější rovině lze toto postavení označit pojmy *master* (M) a *slave* (S). Vlastností některých zdrojů také bývá možnost změny režimu práce v závislosti na změně stavu sítě. Z toho důvodu je v modulu zdroje zahrnuto nastavení řídicího módu (*Control mode* – signál *ctrlmode*) - režimu práce jak v synchronním provozu, tak v provozu ostrovním, které reprezentují ony možné stavy sítě. Logicky mohou existovat 4 kombinace režimů chování zdroje v synchronním/ostrovním provozu: S/S, S/M, M/S a M/M. Praktická využitelnost zdroje M/S, tedy zdroje, který v synchronním provozu sítě plní úlohu pilotního uzlu s primární regulací činného výkonu a frekvence a v případě ostrovního provozu sítě úlohu zdroje dodávajícího činný a jalový výkon podle definovaných charakteristik, je přinejmenším diskutabilní, a proto v možných nastaveních nefiguruje.

Obě základní nastavení uvedená předchozích dvou odstavcích jsou spolu s nominálními parametry výkonu, napětí a frekvence klíčovými pro *modul řízení*, který s těmito informacemi dále konkrétně pracuje. Proto jsou následující kapitoly řazeny v pořadí, které odpovídá procesu práce celkového algoritmu modulu regulace.

F01 – Nominální a požadovaný P

Funkce je jednak schopna realizovat zadání požadovaného činného výkonu zdroje a jednak se skrze ni dá realizovat požadavek na možnost externího řízení činného výkonu VM vycházející z požadavků PPDS (v této práci rozvedena v kapitole PPDS 9.3.4 (součást kapitoly 3.1.1)).

Na obr. 10-12 je uvedeno schéma následované popisem schématu a popisem uživatelského nastavení.



obr. 10-12: Schéma funkce F01 – zpracování nominálního a požadovaného P

V horní části schématu je realizována funkce volby nominálního výkonu zdroje. Ta může být zadána jako nominální sdružený výkon – maximální činný výkon zdroje je určen okrajem výseče se středem v počátku souřadnicových os P-Q diagramu a jeho aktuální hodnota je dána velikostí aktuálního jalového výkonu – Q_{act} , nebo jako nominální činný výkon – maximální činný výkon zdroje roven hodnotě P_{nom} a tvoří tak přímkou rovnoběžnou s osou P P-Q diagramu (viz kapitolu 3.3.4). Výstupem je hodnota nominálního činného výkonu zdroje v jednotkách kW – P_{nom_kW} .

Realizace této funkce požadovaného činného výkonu je v podstatě velmi jednoduchá. Uživateli je umožněno zadat požadovaný výkon zdroje v poměrných jednotkách (přepočteno pomocí nominálního výkonu zdroje – P_{nom}) nebo v jednotkách kW – P_{req} . Jednotky zadaného požadovaného výkonu jsou zadány volbou $choice_P$. Výstupem je požadovaná hodnota činného výkonu v jednotkách kW – P_{req_kW} . Parametr P_{req} je v modulu definován typem proměnné *variable* (viz kapitolu 6.5.1) právě z důvodu možnosti vyvedení vstupu jako proměnné a možnosti tak realizovat požadavek na změnu výkonu dispečinkem.

Oba výstupní signály vstupují do funkce F02 – Výběr a rampa požadovaných P a Q.

Uživatelské nastavení je realizováno:

- v (1.) záložce *Configuration*,
 - skupině *Nominal parameters*,
 - parametr *Power input type* – $choice_PS$,
 - parametr *Nominal power* – P_{nom} ,
 - skupině *Required parameters*,
 - parametr *Required power input type* – $choice_P$,
 - parametr *Required power* – P_{req} .

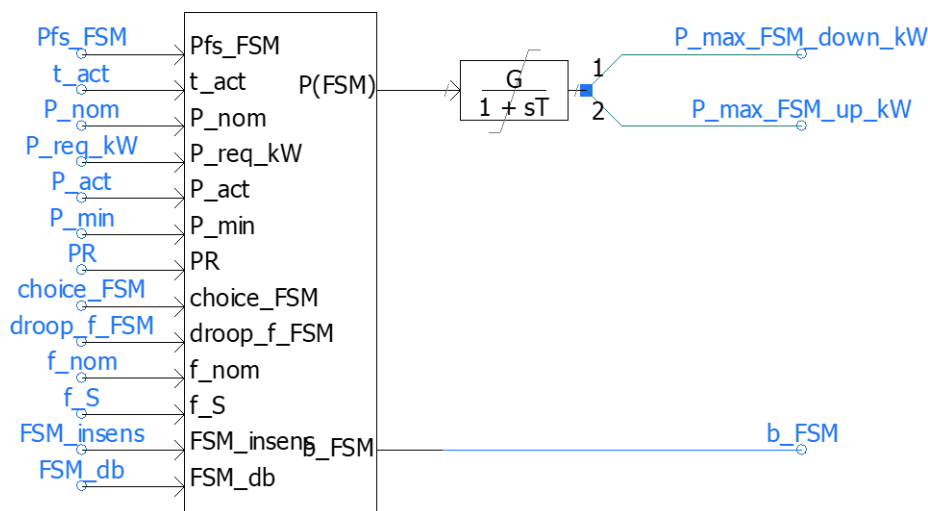
F11 – $P = f(f)$

Funkce závislosti velikosti činného výkonu na frekvenci v místě připojení (v síti) vychází z požadavků kodexu PS a v této práci je rozvedena v kapitole Kodex 4.8 (součást kapitoly 3.1.1). Funkce je také předmětem požadavku na možnost provádění simulací souladu dle RfG popsané v kapitole Odezva ve frekvenčně závislém režimu (součást kapitoly 9.1.1).

Před popisem samotné realizace této funkce je nutné uvést do kontextu vyjádření popisu této funkce v dokumentech popisujících požadavky na tuto funkci. Rozpětí činného výkonu vztažené k

maximální kapacitě – $|\Delta P_1|/P_{\max}$ tak, jak je uveden v RfG [1] a Kodexu PS [2] je vždy vztažen k maximální kapacitě VM (v rámci této práce tedy k nominálnímu výkonu). Nastává totiž rozpor v označení omezení funkce v obrázcích popisující tuto funkci v daných dokumentech. Tento obrázek je znázorněn na obr. 3-18 v kapitole Kodex 4.8 (součást kapitoly 3.1.1, na straně 70). (Obrázek odpovídá tomu, uvedenému v RfG.) Mez ukončení regulace je zde označena jako $|\Delta P_1|/P_{\text{ref}}$, resp. $-|\Delta P_1|/P_{\text{ref}}$, což neodpovídá požadavku definice dané meze (která je $|\Delta P_1|/P_{\max}$). P_{ref} a P_{\max} totiž mohou nabývat různých hodnot v závislosti na typu VM (a to NVM, SVM). Dále, funkce frekvenční závislosti činného výkonu je ukončena buď dosažením pásma necitlivosti frekvenční odezvy nebo dosažení nastaveného rozpětí činného výkonu. To má obecně další návaznosti na funkce, které navazují na tento typ regulace – funkce F12 – Odezva v omezeném frekvenčně závislém režimu při podfrekvenci a funkce F13 – Odezva v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci. Z důvodu možnosti nastavení nulové hodnoty necitlivosti na změnu frekvence z důvodu požadavků na simulace dle metodiky [50] je funkce doplněna o možnost pozdržení činnosti funkce.

Na obr. 10-13 je uvedeno schéma následované popisem schématu a popisem uživatelského nastavení.



obr. 10-13: Schéma funkce F11 – $P = f(f)$

Funkce je řešena definicí DG_control_Pf_FSM, jejíž výstupy vstupují do přenosové funkce (prvek Real Pole), která pracuje se zesílením 1, nastavitelnou časovou konstantou TC_FSM a limitem od 0 do P_{nom} . Výstupem pak jsou signály $P_{\text{max_FSM_down_kW}}$, resp. $P_{\text{max_FSM_up_kW}}$, které se v dalších návaznostech uplatňují ve výběru maxima, resp. minima. Třetím výstupem je signál b_FSM , který v dalších návaznostech blokuje funkci rampy v čase, kdy je funkce $P = f(f)$ uplatňována.

Další návaznost výstupního signálu je uvedena v popisu funkce F02 – Výběr a rampa požadovaných P a Q.

definice DG_control_Pf_FSM

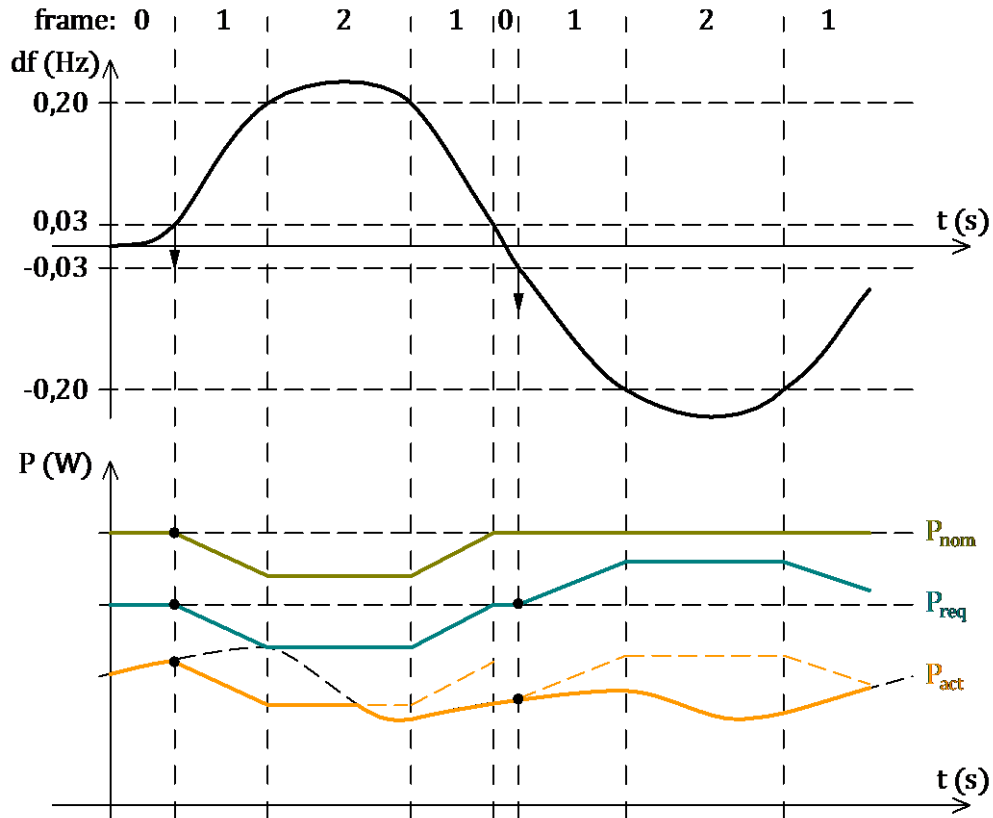
Výstupem definice DG_control_Pf_FSM je požadovaná hodnota činného výkonu při změně frekvence mimo nastavenou necitlivost frekvenční odezvy dle funkce, která je dána odchylkou frekvence od nominální hodnoty, nastavenou statikou a mezemi pásma necitlivosti frekvenční odezvy a dovoleného/nastaveného rozpětím činného výkonu.

Podmínka, která podmiňuje k činnosti funkci $P = f(f)$ je definována skrze signál Pfs_FSM a signál t_act . Signál t_act reprezentuje čas aktivace funkce – před uplynutím této doby není funkce frekvenční odezvy realizována. Při volbě parametru Frequency sensitive mode „none“ je na výstup $P_max_FSM_down_kW$, resp. $P_max_FSM_up_kW$ poslána hodnota nula, resp. hodnota nominálního výkonu VM – P_nom . Na výstup b_Pf_up je pak v tomto případě poslána nulová hodnota. V případě volby „ $P = f(f)$ “ je proveden algoritmus popsáný v následujících odstavcích.

Funkce je rozdělena do tří sekcí, které určuje vnitřní pomocná proměnná $frame$ na základě aktuální frekvence – f_S , nastavené necitlivosti frekvenční odezvy – FSM_insens a nastaveného pásma necitlivosti frekvenční odezvy – FSM_db .

Na začátku simulace je $frame = 0$. To platí až do překročení nastavené odchylky necitlivosti f_insens , která inicializuje přechod do sekce $frame = 1$. Sekce $frame = 2$ je inicializována překročením pásma necitlivosti f_db . V rámci sekcí $frame = 1$ a 2 mohou nastat dva případy průběhu navazujících algoritmů, podle směru odchylky okamžité hodnoty frekvence – f_S od její nominální hodnoty – f_nom . V sekci $frame = 1$ dochází k implementaci funkce $P = f(f)$ podle rovnice 9.1 (strana 148), k čemuž jsou využity proměnné aktuální hodnoty činného výkonu – P_act nebo požadované hodnoty činného výkonu – P_req , podle volby $choice_FSM$, která je volbou uživatele o tom, která hodnota činného výkonu bude brána pro výpočet funkce $P = f(f)$. Důsledek volby je patrný z obr. 10-14, kde volba „ P_nom “ odpovídá tmavě žluté křivce a volba „ P_act “ oranžové křivce. (Přitom platí, že volba „ P_nom “ by měla platit pro SVM, a volba „ P_act “ pro NVM.) Dále se v rovnici uplatňují proměnné FSM_insens (necitlivost frekvenční odezvy), f_S (okamžitá hodnota frekvence), f_nom – nominální hodnota frekvence a $droop_f_FSM$ – statika charakteristiky $P=f(f)$. Výstup této rovnice se uplatní pouze tehdy, není-li vyčerpána výkonová rezerva do nominálního výkonu zdroje (P_nom) (která je počítána jako rozdíl hodnoty nominálního výkonu (P_nom) a hodnoty výkonu v čase inicializace funkce $P = f(f)$ (P_act) nebo hodnoty požadovaného výkonu v čase inicializace funkce $P = f(f)$ (P_req), v závislosti na volbě hodnoty výkonu pro výpočet funkce $P = f(f)$ ($choice_FSM$)) nebo nastavené rozpětí činného výkonu vztažené k maximální kapacitě – PR (která je dána rozpětím činného výkonu vztaženém k maximální kapacitě – $|ΔP_I|/P_{max}$ (zadávané v procentech)) v případě požadavku na zvýšení výkonu, tedy při poklesu frekvence. Výběrem minima z těchto tří hodnot je vybrán požadovaný výkon zdroje v rámci frekvenčně závislého režimu při poklesu frekvence. V opačném případě, kdy frekvence roste a výstupem rovnice je požadavek na snížení výkonu, je výstup rovnice porovnáván s výkonovou rezervou do minimálního výkonu zdroje – P_min a opět nastaveným rozpětím činného výkonu. Výběrem maxima z těchto tří hodnot je pak vybrán požadovaný výkon zdroje v rámci frekvenčně závislého režimu při zvýšení frekvence. V rámci sekce $frame = 2$ je výstupem pro uplatnění frekvenčně závislého režimu poslední dosažená hodnota požadovaného výkonu VM podle rovnic uplatněných v sekci $frame = 1$.

Výstupy funkce F11 jsou dva elementy, které se uplatňují v následném výběru funkce rampy v rámci funkce F02 – Výběr a rampa požadovaných P a Q . Ač by tato funkce měla mít prioritu, není v rámci modulu řízení možnost priority implementována. Bylo tak rozhodnuto z důvodu případného nutného navýšení složitosti modelu a tím pádem i vyššími požadavky na výpočetní výkon. Navíc, myšlenka funkce modelů je taková, že chce umožnit uživateli zvolit si nastavení různých funkcí samostatně, podle vlastní potřeby. Ilustrace průběhu algoritmu výpočtu je uveden na obr. 10-14.



obr. 10-14: Ilustrace výstupů algoritmů funkce F11

Šipky v ilustraci značí inicializaci změny, body značí důsledek.

Zdrojový kód definice *DG_control_Pf_down*:

```
#INCLUDE 's1.h'
#include 'emtstor.h'
#LOCAL INTEGER frame
#LOCAL REAL P_FSM, P_funkce, P1, P2, P3,

frame = STORI(NSTORI)
P_FSM = STORF(NSTORF)
P_funkce = STORF(NSTORF + 1)

IF (time == delt) THEN
    frame = 0
    P_FSM = $P_req
    P_funkce = 0
ENDIF

IF (($Pfs_FSM == 1) .AND. (time >= $t_act)) THEN

IF ($FSM_insens > abs($f_S - $f_nom)) THEN
    frame = 0
ENDIF
IF ($FSM_db <= abs($f_S - $f_nom)) THEN
    frame = 2
ENDIF
IF (($FSM_insens <= abs($f_S - $f_nom)) .AND.
(frame == 0)) THEN
    frame = 1
    P_FSM = $P_act
    IF ($choice_FSM == 1) THEN
        P_FSM = $P_req
    ENDIF
ENDIF
IF (($FSM_insens <= abs($f_S - $f_nom)) .AND.
(frame == 2)) THEN
    frame = 1
ENDIF
```

```
IF ((frame == 2) .AND. ($f_S < $f_nom)) THEN
    $P_out(1) = P_FSM + P_funkce
    $P_out(2) = $P_nom
    $b_FSM = 1
ENDIF

IF ((frame == 1) .AND. ($f_S >= $f_nom)) THEN
    P1 = $P_min - P_FSM
    P2 = -$PR / 100 * $P_nom
    IF ($choice_FSM == 0) THEN
        P3 = P_FSM * 100 * ($FSM_insens -
    $f_S + $f_nom) / $droop_f_FSM / $f_nom
        P_funkce = MAX(P1, P2, P3)
    ELSE
        P3 = P_nom * 100 * ($FSM_insens -
    $f_S + $f_nom) / $droop_f_FSM / $f_nom
        P_funkce = MAX(P1, P2, P3)
    ENDIF
    $P_out(1) = $P_req
    $P_out(2) = P_FSM + P_funkce
    $b_FSM = 1
ENDIF

IF ((frame == 2) .AND. ($f_S > $f_nom)) THEN
    $P_out(1) = $P_req
    $P_out(2) = P_FSM + P_funkce
    $b_FSM = 1
ENDIF

ELSE
    $P_out(1) = 0
    $P_out(2) = $P_nom
    $b_FSM = 0
ENDIF
```

```

IF (frame == 0) THEN
    $P_out(1) = $P_req
    $P_out(2) = $P_nom
    $b_FSM = 0
ENDIF

IF ((frame == 1) .AND. ($f_S <= $f_nom)) THEN
    P1 = $P_nom - P_FSM
    P2 = $PR / 100 * $P_nom
    IF ($choice_FSM == 0) THEN
        P3 = P_FSM * 100 * (-$FSM_insens -
        $f_S + $f_nom) / $droop_f_FSM / $f_nom
        P_funkce = MIN(P1, P2, P3)
    ELSE
        P3 = P_nom * 100 * (-$FSM_insens -
        $f_S + $f_nom) / $droop_f_FSM / $f_nom
        P_funkce = MIN(P1, P2, P3)
    ENDIF
    $P_out(1) = P_FSM + P_funkce
    $P_out(2) = $P_nom
    $b_FSM = 1
ENDIF

STORI(NSTORI) = frame
STORF(NSTORF) = P_FSM
STORF(NSTORF + 1) = P_funkce

NSTORI = NSTORI + 1
NSTORF = NSTORF + 2

```

Uživatelské nastavení je realizováno:

- v (1.) záložce *Configuration*,
 - skupině *Nominal parameters*,
 - parametr *Nominal power* – P_{nom} ,
 - parametr *Minimum regulating level* – P_{min} ,
 - parametr *Nominal frequency (Hz)* – f_{nom} ,
 - skupině *Required parameters*,
 - parametr *Required power* – P_{req} ,
- v (2.) záložce *Power curves*,
 - skupině *FSM*,
 - parametr *Frequency sensitive mode* – P_{fs_FSM} ,
 - parametr *Activation time* – t_{act} ,
 - parametr *Active power range* – PR ,
 - parametr *Value of power for P(f) function* – $choice_FSM$,
 - parametr *Droop sl* – $droop_f_FSM$,
 - parametr *Frequency response insensitivity* – FSM_insens ,
 - parametr *Frequency response deadband* – FSM_db ,
 - parametr *Time constant* – TC_FSM .

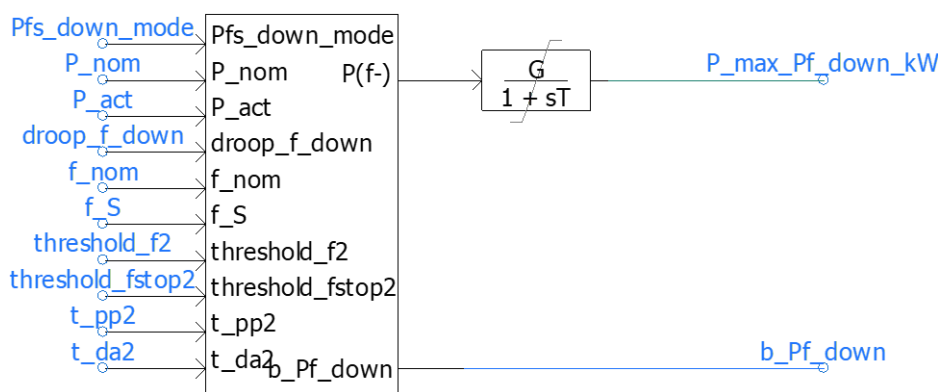
F12 – $P = f(f_-)$

Funkce závislosti velikosti činného výkonu při podfrekvenci v místě připojení (v síti) vychází z požadavků PPDS a v této práci je rozvedena v kapitole PPDS 9.3.2.1 (součást kapitoly 3.1.1). Funkce je také předmětem požadavku na možnost provádění simulací souladu dle RfG popsané v kapitole Odezva v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci (součást kapitoly 9.1.1).

Filozoficky je tato funkce velmi podobná funkci F13 – $P = f(f_+)$. Logicky však působí v opačném směru (zvyšování výkonu) při poklesu frekvence. Rozdíl dále je, že start samotné regulace po uplynutí počáteční prodlevy (t_{pp}) začíná vždy od aktuální hodnoty činného výkonu v tomto čase.

Důležitá je návaznost výstupního signálu funkce. Ten nevstupuje jako výstupy ostatních regulačních funkcí do výběru minima, ale je prvně porovnáván ve výběru maxima s hodnotou požadovaného výkonu a hodnotou výstupu funkce frekvenčně závislého režimu (přesněji jeho výstupem při poklesu frekvence pod nominální, resp. prahovou hodnotu). Důvod této návaznosti je ve směru působení této regulace. Oproti ostatním regulacím činného výkonu totiž dává požadavek na zvýšení činného výkonu. Ten je obecně v rozporu s požadavkem na okamžitý výkon zdroje. Aby se požadavek v konečném důsledku uplatnil na výběru minima (v rámci funkce F02 – Výběr a rampa požadovaných P a Q) musí být vyrušen požadavek na požadovaný výkon – výběrem maxima. Provedení také souvisí s možností testovat tuto funkci. Žádanou hodnotou výkonu (P_{req}) je možno vytvořit výkonovou rezervu a sledovat odezvu regulační funkce při poklesu frekvence.

Na obr. 10-15 je uvedeno schéma následované popisem schématu a popisem uživatelského nastavení.



obr. 10-15: Schéma funkce F12 – $P = f(f-)$

Funkce je řešena definicí DG_control_Pf_down, jejíž výstup vstupuje do přenosové funkce (prvek Real Pole), která pracuje se zesílením 1, nastavitelnou časovou konstantou TC_{Pfs_down} a limitem od 0 do P_{nom} . Výstupem pak je signál $P_{max_Pf_down_kW}$, který se v dalších návaznostech uplatňuje ve výběru maxima. Druhým výstupem je signál b_{Pf_up} , který v dalších návaznostech blokuje funkci rampy v čase, kdy je funkce $P = f(f-)$ uplatňována.

Další návaznost výstupního signálu je uvedena v popisu funkce F02 – Výběr a rampa požadovaných P a Q.

definice DG_control_Pf_down

Výstupem definice DG_control_Pf_down je požadovaná hodnota činného výkonu při poklesu frekvence pod nastavenou prahovou hodnotu dle dané funkce, se zvolenou statikou.

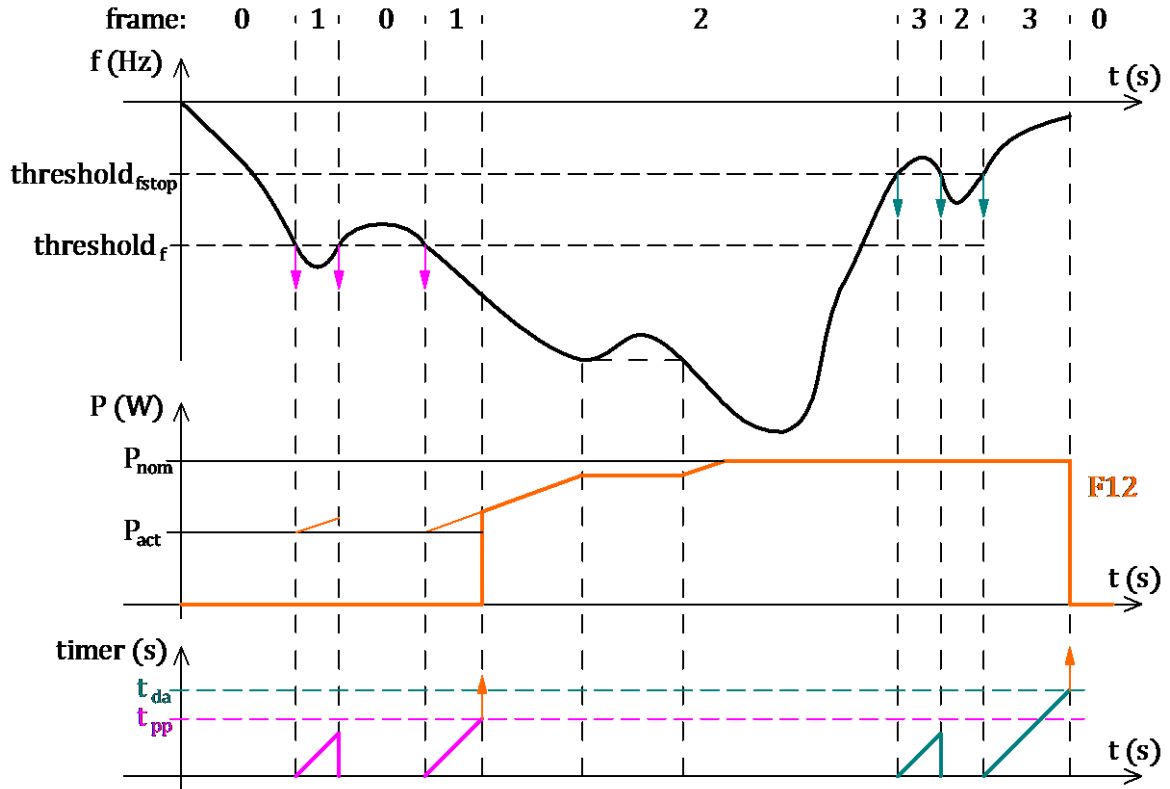
Podmínka, která podmiňuje k činnosti funkci $P = f(f-)$ je definována skrze signál Pfs_down_mode . Při volbě parametru P(f-) slave mode „none“ je na výstup definice i výstup pro blokování rampy (b_{Pf_up}) poslána nulová hodnota. V případě volby „ $P = f(f-)$ “ je proveden algoritmus popsany v následujících odstavcích.

Funkce je rozdělena do čtyř sekcí, které určuje vnitřní pomocná proměnná *frame* na základě současně platné sekce, aktuální frekvence – f_S a prahových hodnot frekvence $threshold_f2$ – určující mez začátku omezovací regulace výkonu při poklesu frekvence, a $threshold_fstop2$ – určující ukončení celé funkce při nárůstu frekvence. Pro přechod do konkrétní sekce se dále uplatňuje vnitřní pomocná proměnná *timer*, která funguje jako čítač pro uplatnění nastavitelných

časových prodlev t_{pp2} – určující prodlevu začátku regulace od snižující se frekvence (počáteční prodleva), a t_{da2} – určující prodlevu pro ukončení celé funkce (deaktivace).

Na začátku simulace je $frame = 0$. To platí až do překročení (podkročení) prahové hodnoty frekvence $threshold_f2$, která inicializuje přechod do druhé sekce – $frame = 1$. Tato sekce má za úkol načítat do proměnné $timer$ čas simulace. Do další sekce ($frame = 2$) se algoritmus dostane po uplynutí časové prodlevy t_{pp2} v rámci sekce $frame = 1$. Pokud dojde během časového intervalu t_{pp2} k nárůstu frekvence nad prahovou hodnotu $threshold_f2$, je inicializován přechod zpět do sekce $frame = 0$. V sekci $frame = 2$ je prováděna vlastní omezovací funkce činného výkonu zdroje. K tomu dochází podle rovnice 9.2 (strana 149), k čemuž jsou využity proměnné aktuální hodnoty frekvence – f_S , prahové hodnoty frekvence pro aktivaci poskytování frekvenční odezvy činného výkonu – $threshold_f2$, jmenovité hodnoty frekvence v síti – f_nom a statika charakteristiky $P=f(f)$ – $droop_f_down$. Požadavek na zvyšování činného výkonu je prováděn až do hodnoty P_nom – nominálního výkonu zdroje. Jako výstupní hodnota je vždy brána vyšší hodnota z předchozího kroku simulace a současného kroku simulace. To ve výsledku zajistí zafixování hodnoty požadovaného výkonu při návratu frekvence k nominální hodnotě. Pro opuštění sekce $frame = 2$ je nutné, aby se frekvence f_S navrátila nad prahovou hodnotu $threshold_fstop2$. Tak je inicializována poslední sekce – $frame = 3$, která používá vnitřní proměnnou $timer$ jako časovač, kdy čeká na uplynutí doby t_{da2} (za současné podmínky $f_S < threshold_fstop2$) a ukončuje regulaci od snížené frekvence.

Funkce F12 je pouze jeden element, který se uplatňuje v následném výběru minima a funkce rampy v rámci funkce F02 – Výběr a rampa požadovaných P a Q. Proto je po ukončení funkce výstupem nulová hodnota výkonu. Průběh funkce ilustruje obr. 10-16. V PPDS [47] ani ČSN EN 50549 [48] není jasně uvedeno chování omezovací regulace během počáteční časové prodlevy a prodlevy deaktivace. V rámci této práce bylo zvoleno řešení, které je jasně patrné z ilustrace na obr. 10-16.



obr. 10-16: Ilustrace výstupu algoritmu funkce F12

Zdrojový kód definice *DG_control_Pf_down*:

```
#INCLUDE 's1.h'
#INCLUDE 'emtstor.h'
#LOCAL INTEGER frame
#LOCAL REAL pout, timer, pth1

IF ($Pfs_down_mode == 1) THEN

    frame = STORI(NSTORI)
    pout = STORF(NSTORF)
    timer = STORF(NSTORF + 1)
    pth1 = STORF(NSTORF + 2)

    IF (time == delt) THEN
        frame = 0
        pout = 0
        timer = 0
        pth1 = 0
    ENDIF

    IF ((frame /= 2) .AND. ($f_S <= $threshold_f2))
    THEN
        frame = 1
        timer = timer + delt
        pth1 = $P_act
    ENDIF

    IF ((frame == 1) .AND. ($f_S >= $threshold_f2))
    THEN
        frame = 0
        timer = 0
    ENDIF

    IF ((frame == 1) .AND. (timer >= $t_pp2)) THEN
        frame = 2
        timer = 0
        pth1 = $P_act
    ENDIF

    IF ((frame == 2) .AND. ($f_S >=
    $threshold_fstop2)) THEN
        frame = 3
        timer = 0
        pth1 = 0
    ENDIF

    IF ((frame == 3) .AND. ($f_S <=
    $threshold_fstop2)) THEN
        frame = 2
        timer = 0
    ENDIF

    IF ((frame == 3) .AND. (timer >= $t_da2)) THEN
        frame = 0
        timer = 0
    ENDIF

    IF (frame == 0) THEN
        $P_out = 0
        $b_Pf_down = 0
        pout = $P_act
    ENDIF

    IF (frame == 2) THEN
        $P_out = pth1 + ($P_nom * 100 *
        ($threshold_f2 - $f_S) / $droop_f_down / $f_nom)
        $b_Pf_down = 1
    ENDIF

    IF (frame == 3) THEN
        $P_out = pout
        $b_Pf_down = 1
    ENDIF

    STORI(NSTORI) = frame
    STORF(NSTORF) = pout
    STORF(NSTORF + 1) = timer
    STORF(NSTORF + 2) = pth1

    NSTORI = NSTORI + 1
    NSTORF = NSTORF + 3
ENDIF

IF ($Pfs_down_mode == 0) THEN
```



```

ENDIF
IF (frame == 3) THEN
    timer = timer + delt
ENDIF

```

```

$P_out = 0
$b_Pf_down = 0
ENDIF

```

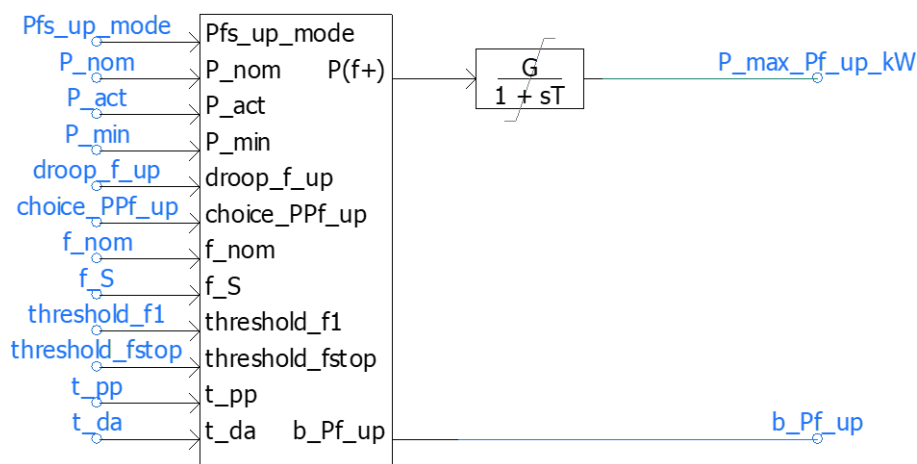
Uživatelské nastavení je realizováno:

- v (1.) záložce *Configuration*,
 - skupině *Nominal parameters*,
 - parametr *Nominal power* – P_{nom} ,
 - parametr *Nominal frequency (Hz)* – f_{nom} ,
- v (2.) záložce *Power curves*,
 - skupině *P(f-) mode – slave*,
 - parametr *P(f+) slave mode* – $P_{fs_up_mode}$,
 - parametr *Threshold f1* – $threshold_f2$,
 - parametr *Threshold fstop* – $threshold_fstop2$,
 - parametr *Droop s2* – $droop_f_down$,
 - parametr *Initial delay* – t_{pp2} ,
 - parametr *Deactivation delay* – t_{da2} ,
 - parametr *Time constant* – TC_Pfs_down .

F13 – $P = f(f+)$

Funkce závislosti velikosti činného výkonu při nadfrekvenci v místě připojení (v síti) vychází z požadavků PPDS a v této práci je rozvedena v kapitole PPDS 9.3.1 (součást kapitoly 3.1.1). Funkce je také předmětem požadavku na možnost provádění simulací souladu dle RfG popsané v kapitole Odezva v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci (součást kapitoly 9.1.1).

Na obr. 10-17 je uvedeno schéma následované popisem schématu a popisem uživatelského nastavení.



obr. 10-17: Schéma funkce F13 – $P = f(f+)$

Funkce je řešena definicí $DG_control_Pf_up$, jejíž výstup vstupuje do přenosové funkce (prvek Real Pole), která pracuje se zesílením 1, nastavitelnou časovou konstantou TC_Pfs_up a limitem od 0 do P_{nom} . Výstupem pak je signál $P_{max_Pf_up_kW}$, který se v dalších návaznostech uplatňuje ve výběru minima. Druhým výstupem je signál b_{Pf_up} , který v dalších návaznostech blokuje funkci rampy v čase, kdy je funkce $P = f(f+)$ uplatňována.

Další návaznosti výstupních signálů je uvedena v popisu funkce F02 – Výběr a rampa požadovaných P a Q.

definice DG_control_Pf_up

Definice DG_control_Pf_up určuje maximální možný výkon zdroje při zvýšené frekvenci v síti.

Podmínka, která podmiňuje k činnosti funkci $P = f(f_+)$ je definována skrze signál *Pfs_up_mode*. Při volbě parametru P(f+) slave mode „none“ je na výstup definice poslána hodnota nominálního výkonu VM (*P_nom*) a na výstup pro blokování rampy (*b_Pf_up*) nula. V případě volby „ $P = f(f_+)$ “ je proveden algoritmus popsáný v následujících odstavcích.

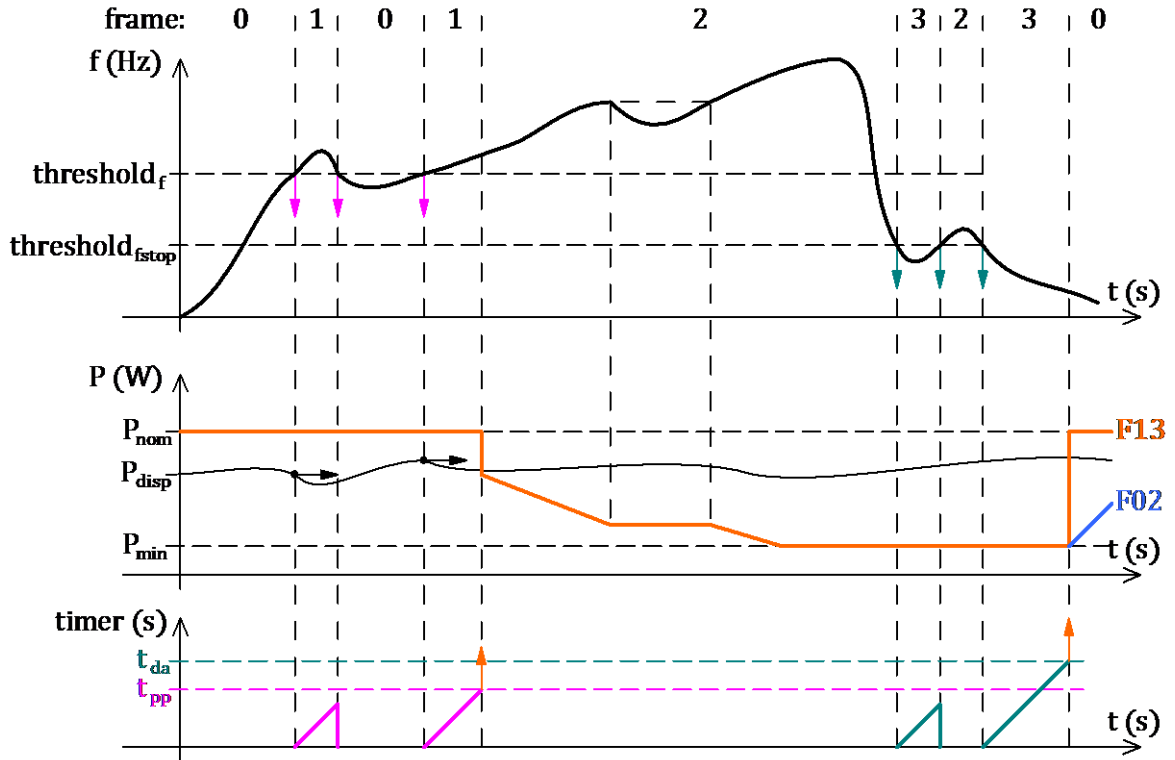
Funkce je rozdělena do čtyř sekcí, které určuje vnitřní pomocná proměnná *frame* na základě současně platné sekce, aktuální frekvence – *f_S* a prahových hodnot frekvence *threshold_f1* – určující mez začátku omezování výkonu při zvýšení frekvence, a *threshold_fstop* – určující ukončení celé funkce při poklesu frekvence. Pro přechod do konkrétní sekce se dále uplatňuje vnitřní pomocná proměnná *timer*, která funguje jako čítač pro uplatnění nastavitelných časových prodlev *t_pp* – určující prodlevu začátku regulace omezení od zvyšující se frekvence (počáteční prodleva), a *t_da* – určující prodlevu pro ukončení celé funkce (deaktivace).

Na začátku simulace je *frame* = 0. To platí až do překročení prahové hodnoty frekvence *threshold_f1*, která inicializuje přechod do druhé sekce – *frame* = 1. Tato sekce má za úkol zapamatovat si *P_act* – aktuální činný výkon zdroje, v čase překročení prahové hodnoty frekvence pro možnost použití této hodnoty pro omezující funkci uplatněné v třetí sekci – *frame* = 2. Do této sekce (*frame* = 2) se algoritmus dostane po uplynutí časové prodlevy *t_pp* v rámci sekce *frame* = 1. Pokud dojde během časového intervalu *t_pp* k poklesu frekvence pod prahovou hodnotu *threshold_f1*, je inicializován přechod zpět do sekce *frame* = 0. V sekci *frame* = 2 je prováděno vlastní omezení činného výkonu zdroje. K tomu dochází podle rovnice 9.3 (strana 149), k čemuž jsou využity proměnné aktuální hodnoty frekvence – *f_S*, prahové hodnoty frekvence pro aktivaci poskytování frekvenční odezvy činného výkonu – *threshold_f1*, jmenovité hodnota frekvence v síti – *f_nom* a statika charakteristiky $P=f(f)$ – *droop_f_up*. Na hodnotě signálu volby *choice_PPf_up* pak závisí, jestli bude snižování činného výkonu probíhat od nominálního výkonu (*P_nom*) (volba „*P_nom*“) nebo od aktuálního (volba „*P_act*“) v čase překročení prahové hodnoty frekvence *threshold_f1*. Požadavek na snižování činného výkonu je prováděn až do hodnoty *P_min*, která určuje minimální výkon zdroje a může být brána jako minimální regulační úroveň. Jako výstupní hodnota je vždy brána nižší hodnota z předchozího kroku simulace a současného kroku simulace. To ve výsledku zajistí zafixování hodnoty požadovaného výkonu při návratu frekvence k nominální hodnotě. Pro opuštění sekce *frame* = 2 je nutné, aby frekvence *f_S* klesla pod prahovou hodnotu *threshold_fstop*. Tak je inicializována poslední sekce – *frame* = 3, která používá vnitřní proměnnou *timer* jako časovač, kdy čeká na uplynutí doby *t_da* (za současné podmínky $f_S < threshold_fstop$) a ukončuje omezovací regulaci od zvýšené frekvence.

Hodnota signálu *b_Pf_up* je nula v případě, kdy nedochází k funkci $P = f(f_+)$ – to znamená, pokud platí *frame* = 0 nebo 1. V případě aktivní funkce je hodnota signálu *b_Pf_up* rovná jedné – při *frame* = 2 nebo 3.

Funkce F13 je pouze jeden element, který se uplatňuje v následném výběru minima a funkce rampy v rámci funkce F02 – Výběr a rampa požadovaných P a Q. Proto je po ukončení funkce výstupem nominální hodnota výkonu. Průběh funkce ilustruje obr. 10-18. V PPDS [47] ani ČSN EN 50549 [48] není jasně uvedeno chování omezovací regulace během počáteční časové

prodlevy a prodlevy deaktivace. V rámci této práce bylo zvoleno řešení, které je jasně patrné z ilustrace na obr. 10-18.



obr. 10-18: Ilustrace výstupu algoritmu funkce F13

V ilustraci je zvolena volba zapamatování aktuálního výkonu pro funkci regulace (volba $choice_PPf_up = P_act$).

Zdrojový kód definice $DG_control_Pf_up$:

```
#INCLUDE 's1.h'
#include 'emtstor.h'
#LOCAL INTEGER frame
#LOCAL REAL pout, timer, pth1
```

```
IF ($Pfs_up_mode == 1) THEN
```

```
frame = STORI(NSTORI)
pout = STORF(NSTORF)
timer = STORF(NSTORF + 1)
pth1 = STORF(NSTORF + 2)
```

```
IF (time == delt) THEN
    frame = 0
    pout = $P_nom
    timer = 0
    pth1 = $P_nom
ENDIF
```

```
IF ((frame /= 2) .AND. ($f_S >= $threshold_f1))
THEN
```

```
    frame = 1
    timer = timer + delt
    IF ($choice_PPf_up == 0) THEN
        pth1 = $P_act
    ELSE
        pth1 = $P_nom
    ENDIF
ENDIF
```

```
IF ((frame == 1) .AND. ($f_S <= $threshold_f1))
THEN
    frame = 0
```

```
IF ((frame == 3) .AND. (timer >= $t_da)) THEN
    frame = 0
    timer = 0
ENDIF
```

```
IF (frame == 0) THEN
    $P_out = $P_nom
    $b_Pf_up = 0
    pout = $P_nom
ENDIF
```

```
IF ((frame == 1) .AND. (timer == delt)) THEN
    IF ($choice_PPf_up == 0) THEN
        pth1 = $P_act
    ELSE
        pth1 = $P_nom
    ENDIF
    $P_out = $P_nom
    $b_Pf_up = 0
ENDIF
```

```
IF (frame == 2) THEN
    pout = MIN((pth1 + ($P_nom * 100 *
($threshold_f1 - $f_S) / $droop_f_up / $f_nom)),
pout)
    $P_out = MAX(pout, $P_min)
    $b_Pf_up = 1
ENDIF
```

```
IF (frame == 3) THEN
    $P_out = MAX(pout, $P_min)
    $b_Pf_up = 1
```

```

        timer = 0
    ENDIF
    IF ((frame == 1) .AND. (timer >= $t_pp)) THEN
        frame = 2
        timer = 0
    ENDIF
    IF ((frame == 2) .AND. ($f_S <= $threshold_fstop))
    THEN
        frame = 3
    ENDIF
    IF (frame == 3) THEN
        timer = timer + delt
    ENDIF
    IF ((frame == 3) .AND. ($f_S >= $threshold_fstop))
    THEN
        frame = 2
        timer = 0
    ENDIF
ENDIF
ENDIF
STORI(NSTORI) = frame
STORF(NSTORF) = pout
STORF(NSTORF + 1) = timer
STORF(NSTORF + 2) = pth1
NSTORI = NSTORI + 1
NSTORF = NSTORF + 3
ENDIF
IF ($Pfs_up_mode == 0) THEN
    $P_out = $P_nom
    $b_Pf_up = 0
ENDIF

```

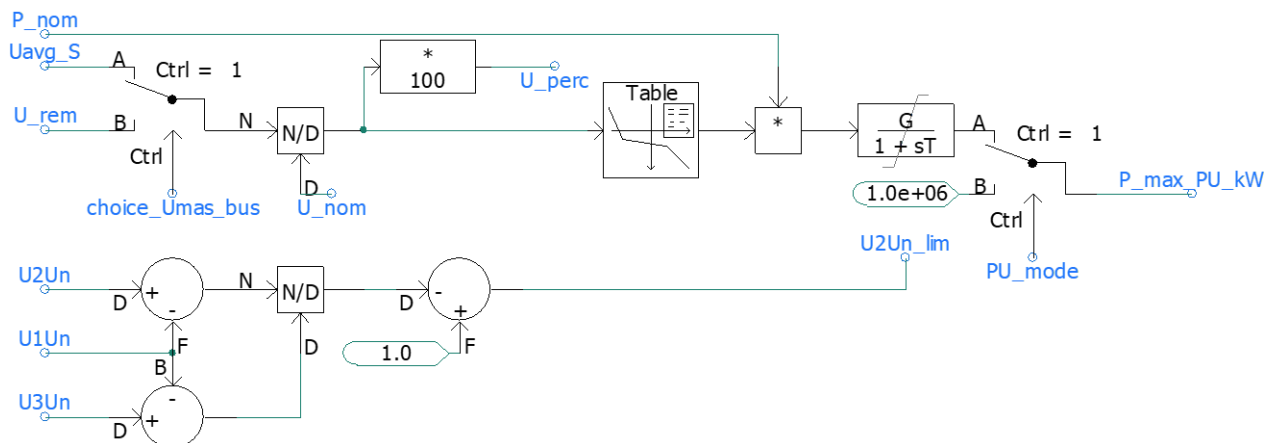
Uživatelské nastavení je realizováno v modulu řízení:

- v (1.) záložce *Configuration*,
 - skupině *Nominal parameters*,
 - parametr *Nominal power* – P_{nom} ,
 - parametr *Nominal frequency (Hz)* – f_{nom} ,
- v (2.) záložce *Power curves*,
 - skupině *P(f+) mode – slave*,
 - parametr *P(f+) slave mode* – Pfs_up_mode ,
 - parametr *Threshold f1* – $threshold_f1$,
 - parametr *Threshold fstop* – $threshold_fstop$,
 - parametr *Droop s2* – $droop_f_up$,
 - parametr *Value of power for P(f+) function* – $choice_PPf_up$,
 - parametr *Minimum power* – P_{min} ,
 - parametr *Initial delay* – t_{pp} ,
 - parametr *Deactivation delay* – t_{da} ,
 - parametr *Time constant* – TC_Pfs_up .

F14 – $P = f(U)$

Funkce závislosti velikosti činného výkonu na napětí v místě připojení vychází z požadavků PPDS a v této práci je rozvedena v kapitole PPDS 9.3.3 (součást kapitoly 3.1.1).

Na obr. 10-19 je uvedeno schéma následované popisem schématu a popisem uživatelského nastavení.

obr. 10-19: Schéma funkce F14 – $P = f(U)$

Na začátku výpočetního algoritmu je volba *choice_Umas_bus*, což je uživatelská volba, která je aktivní v případě možnosti práce zdroje jako master nebo v případě aktivace této funkce. Signál *choice_Umas_bus* je volbou, zda regulace požadovaného činného výkonu v závislosti na napětí bude regulována podle efektivní hodnoty sdruženého napětí v místě připojení – U_{avg_S} , nebo podle napětí jinde v síti – U_rem , které definuje uživatel proměnnou. Dále dochází k přepočtu skutečné efektivní hodnoty sdruženého napětí na procentní hodnotu vztaženou k nominálnímu napětí zdroje – U_nom . Procentní hodnota napětí vztažená k jmenovitému napětí je zde vložena do proměnné – U_perc pro účely funkce regulace $Q = f(U)$ (F16 – $Q = f(U)$). Signál dále vstupuje do prvku tabulky (prvek X-Y Transfer Function), kde je pomocí proměnných $U1Un$ a $U3Un$ definován sklon charakteristiky funkce $P = f(U)$. Výstupem je poměrná hodnota žádaného činného výkonu zdroje, která je přepočtena na skutečnou hodnotu vynásobením nominálním výkonem zdroje – P_nom . Následuje přenosová funkce (prvek Real Pole), která pracuje se zesílením 1, nastavitelnou časovou konstantou TC_PU , horním limitem P_nom a dolním limitem $U2Un_lim$, který je tvořen proměnnými $U1Un$, $U2Un$ a $U3Un$ za účelem nalezení poměrné hodnoty výkonu pro ukončení/zalimitování regulace $P = f(U)$. Poslední prvek, selektor, je ovládán signálem PU_mode , který rozhoduje o uplatnění funkce $P = f(U)$ v dalších návaznostech. Jde o volbu uživatele, která pošle na finální výstup buď hodnotu funkce $P = f(U)$ nebo hodnotu vstupu B, která je pevná a mnohem vyšší, než jaká se kdy může uplatnit v další návaznosti signálu $P_max_PU_kW$, což je výběr minima.

Další návaznost výstupního signálu je uvedena v popisu funkce F02 – Výběr a rampa požadovaných P a Q.

Uživatelské nastavení je realizováno:

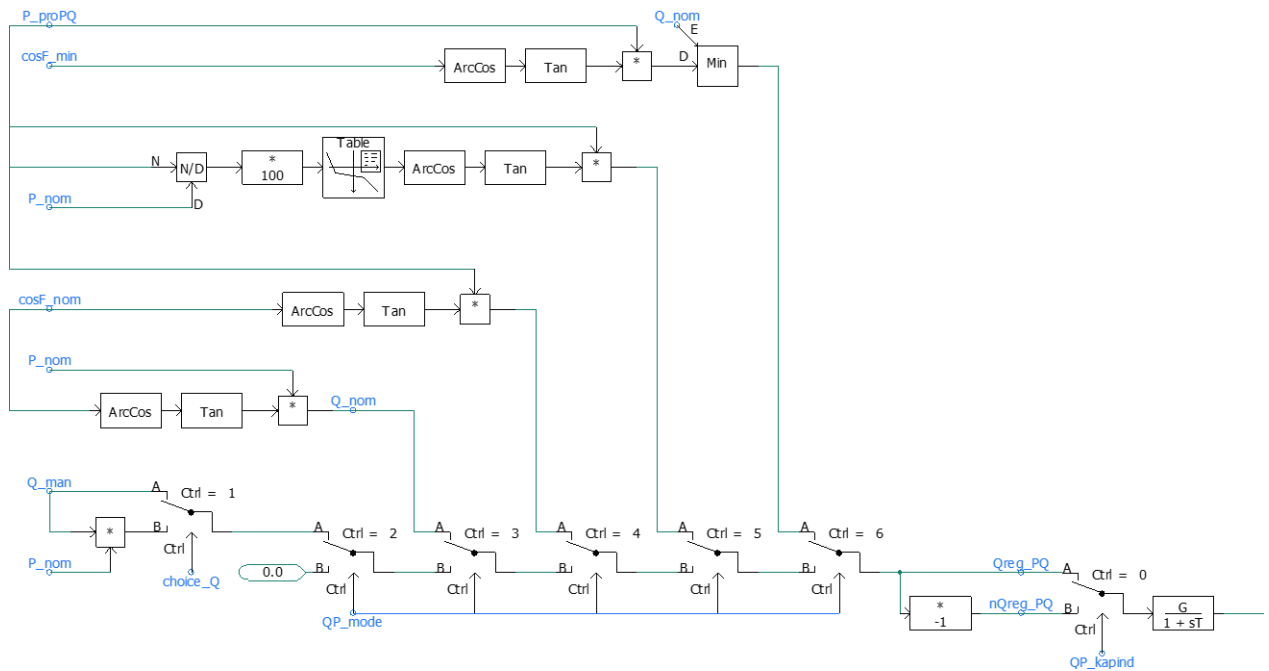
- v (1.) záložce *Configuration*,
 - skupině *Nominal parameters*,
 - parametr *Nominal power* – P_nom ,
 - parametr *Nominal voltage (kV)* – U_nom ,
 - skupině *Required parameters*,
 - parametr *Tracked bus* – *choice_Umas_bus*,
 - parametr *Remote variable* – U_rem ,
- v (2.) záložce *Power curves*,
 - skupině *P(U) mode*,
 - parametr *P(U) mode* – PU_mode ,
 - parametr $U1/Un$ – $U1Un$,

- parametr $U2/U_n - U2U_n$,
- parametr $U3/U_n - U3U_n$,
- parametr *Time constant* – TC_{PU} .

F15 – $Q = f(P)$

Funkce závislosti velikosti jalového výkonu na velikosti činného výkonu zdroje vychází z požadavků PPDS a v této práci je rozvedena v kapitole PPDS 9.4.1 (součást kapitoly 3.1.1). Podrobnější návaznosti k problematice PQU regulací je uvedena v kapitole 3.3.4.

Na obr. 10-20 je uvedeno schéma následované popisem schématu a popisem uživatelského nastavení.



obr. 10-20: Schéma funkce F15 – $Q = f(P)$

Ústředním prvkem této funkce je volba QP_mode , pomocí které uživatel volí typ regulace $Q = f(P)$. Selektory (prvky Two Input Selector), do kterých vstupuje signál QP_mode jsou definovány tak, aby respektovali volbu uživatele na příslušný typ regulace jalového výkonu:

- Pokud má signál QP_mode hodnotu jedna, což odpovídá volbě „ $cosF=1$, $Qn=0$ “, bude na výstupu za posledním selektorem (signál $Qreg_PQ$) žádaná hodnota jalového výkonu 0.
- Pro $QP_mode = 2$ – volba „*manual*“, bude výstupem uživatelem nastavená hodnota Q_man , což odpovídá pevné hodnotě jalového výkonu – $Q = \text{kons.}$ (Q fix). Uživatelská volba $choice_Q$ rozhoduje, jestli je zadaná hodnota Q_man v jednotkách kVAr nebo v poměrných jednotkách vztahených k nominálnímu výkonu zdroje (P_nom).
- Pro $QP_mode = 3$ – volba „ Qn “, bude výstupem podobně jako u volby *manual* fixní hodnota jalového výkonu. Tato hodnota – Q_nom , však bude počítána z hodnoty nominálního účinníku $cosF_nom$ při nominálním výkonu zdroje P_nom . To odpovídá pevné hodnotě jalového výkonu – $Q = \text{kons.}$ (Q fix).
- Pro $QP_mode = 4$ – volba „ $cosFn$ “, bude výstupem hodnota jalového výkonu odpovídající nastavenému fixnímu účinníku zdroje $cosF_nom$, tedy vždy ve správném poměru k aktuálnímu žádanému činnému výkonu zdroje P_proPQ (proměnná tvořena

v rámci funkce F02 – Výběr a rampa požadovaných P a Q). To odpovídá pevné hodnotě účinníku – $\cos\varphi = \text{kons.} (\cos\varphi \text{ fix})$.

- Pro $QP_mode = 5$ – volba „ $\cos F(P)$ “, bude výstupem hodnota jalového výkonu závislá od funkce účinníku na činném výkonu. Charakteristika závislosti velikosti účinníku na činném výkonu je definovaná body 0, Pa_cosFa , Pb_cosFb a 100 na ose činného výkonu v jednotkách % nominálního výkonu a odpovídajícími body $\cos F_{P0}$, $\cos Fa_{Pa}$, $\cos Fb_{Pb}$, resp. $\cos F_{Pn}$ na ose účinníku. Toto řešení umožňuje uživateli definovat různý průběh funkce $\cos\varphi = f(P)$. Toto nastavení odpovídá hodnotě účinníku závislé na činném výkonu – $\cos\varphi = f(P)$ ($\cos\varphi (P)$).
- Pro $QP_mode = 6$ – volba „ $\cos F_{min}, Qn$ “, bude výstupem hodnota požadovaného jalového výkonu dána výběrem menší hodnoty (prvek Maximum/Minimum Function) z hodnoty nominálního jalového výkonu Q_{nom} počítaného z hodnoty nominálního účinníku $\cos F_{nom}$ a hodnoty uživatelem zadané hodnoty minimálního možného účinníku zdroje – $\cos F_{min}$. Toto nastavení odpovídá pevné hodnotě účinníku – $\cos\varphi = \text{kons.} (\cos\varphi \text{ fix})$ s omezením minimálního možného účinníku zdroje.

Takto získaný výstup dává vzniknout proměnným $Qreg_PQ$ a $nQreg_PQ$, které jsou použity ve funkci F16 – $Q = f(U)$. Výběrový člen (prvek Two Input Selector) ovládaný signálem QP_kapind je uživatelskou volbou kapacitního nebo induktivního požadovaného dodávaného jalového výkonu. Velké množství proměnných, které je nutné definovat při použití regulace $Q = f(P)$ je v nastavení modulu řízení zapodmínkováno tak, aby se uživateli po konkrétní volbě typu regulace $Q = f(P)$ (signál QP_mode) povolilo definovat pouze parametry, které jsou užity v daném typu regulace (ostatní parametry zešednou a nelze je parametrizovat). Poslední prvek této funkce je přenosová funkce (prvek Real Pole), která pracuje se zesílením 1, nastavitelnou časovou konstantou TC_QP a bez horního a spodního limitu (neboť samotný průběh všech možných funkcí regulace $Q = f(P)$ přiřazuje ke každé hodnotě P právě jednu hodnotu Q v rozsahu od $P = 0$ až $P = 100 \% P_n$. Topologie této funkce tak, jak je uvedena na obr. 10-20 umožňuje uživateli případně dodefinovat další typy charakteristik.

Další návaznost výstupního signálu je uvedena v popisu funkce F16 – $Q = f(U)$.

Uživatelské nastavení je realizováno:

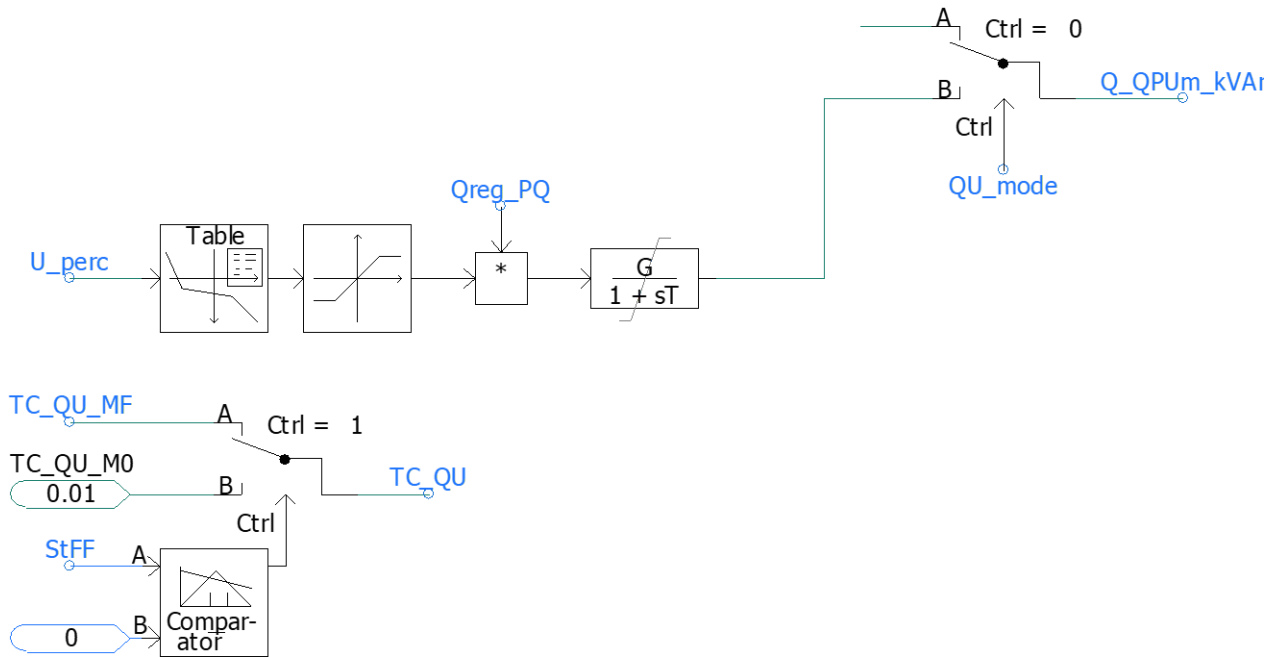
- v (1.) záložce *Configuration*,
 - skupině *Nominal parameters*,
 - parametr *Nominal power* – P_{nom} ,
- v (2.) záložce *Power curves*,
 - skupině *Q(P) mode*,
 - parametr *Q(P) mode* – QP_mode ,
 - parametr *capacitive / inductive* – QP_kapind ,
 - parametr *Required reactive power input* – $choice_Q$,
 - parametr *Required reactive power* – Q_{man} ,
 - parametr *Nominal cosFi* – $\cos F_{nom}$,
 - parametr *Minimal cosFi* – $\cos F_{min}$,
 - parametr $\cos Fi(P0)$ – $\cos F_{P0}$,
 - parametr $\cos Fi(Pa)$ – $\cos Fa_{Pa}$,
 - parametr $\cos Fi(Pb)$ – $\cos Fb_{Pb}$,
 - parametr $\cos Fi(Pn)$ – $\cos F_{Pn}$,
 - parametr $Pa(\cos Fi) \% P_n$ – Pa_cosFa ,

- parametr $Pb(cosFi) \%Pn - Pb_cosFb$,
- parametr *Time constant* – TC_QP .

F16 – $Q = f(U)$

Funkce závislosti velikosti jalového výkonu na napětí vychází z požadavků PPDS a v této práci je rozvedena v kapitole PPDS 9.4.2 (součást kapitoly 3.1.1). Podrobnější návaznosti k problematice PQU regulací je uvedena v kapitole 3.3.4.

Na obr. 10-21 je uvedeno schéma následované popisem schématu a popisem uživatelského nastavení.



obr. 10-21: Schéma funkce F16 – $Q = f(U)$

Vstupem regulace $Q = f(U)$ je signál U_perc , který je počítán v rámci funkce F14 – $P = f(U)$. V následujícím prvku tabulky (prvek X-Y Transfer Function) jsou hodnotám poměrné velikosti jalového výkonu 1, 0, 0, resp. -1 přiřazeny uživatelem nastavitelné hodnoty poměrných velikostí napětí udaných v jednotkách % nominálního napětí zdroje (U_nom) U_Qmax , U_Q0L , U_Q0P , resp. U_nQmax , čímž je zadán průběh charakteristiky $Q = f(U)$. V prvku limiteru (prvek Hard Limiter) jsou uplatněny maximální meze poměrné žádané velikosti jalového výkonu – horní limit 1, dolní limit -1. Dále je žádaná poměrná hodnota vynásobena maximální hodnotou možného jalového výkonu pro daný činný výkon – signálem $Qreg_PQ$, která je tvořena ve funkci F15 – $Q = f(P)$. Následuje přenosová funkce (prvek Real Pole), která pracuje se zesílením 1, časovou konstantou TC_QU (viz dále), horním limitem $Qreg_PQ$ a dolním limitem $nQreg_PQ$ (limity vytvořeny opět ve funkci F15 – $Q = f(P)$). I z limitace nastavené v prvku přenosové funkce je zřejmé tato regulace potřebuje ke své funkci určité pracovní pásmo jalového výkonu pro každou hodnotu činného výkonu. Tato pracovní oblast je vymezena právě funkcí F15 – $Q = f(P)$ (kdy se neuplatňuje volba QP_kapind) čímž vzniká vymezení pracovní oblasti v P-Q diagramu symetrické kolem osy činného výkonu. A právě toto musí být vzato v úvahu při volbě typu regulace jalového výkonu, což je ošetřeno výběrem (prvek Two Input Selector) ovládaným signálem QU_mode , jehož nastavením uživatel volí na výstup požadovaného jalového výkonu zdroje Q_QPUM_kVA buď hodnotu výstupu algoritmu funkce F15 – $Q = f(P)$ anebo hodnotu vypočtenou v algoritmu funkce $Q = f(U)$.

Signál TC_QU je definován na základě provozního stavu modelu zdroje a výpočet tohoto parametru souvisí s potřebou zajištění co nejrychlejšího najetí zdroje na požadované parametry. Pro časovou konstantu TC_QU přenosové funkce (prvku Real Pole) požadovaného jalového výkonu při aktivaci této regulace $Q = f(U)$ je žádoucí, aby během najíždění zdroje na požadované parametry činného a jalového výkonu byla malá. V procesu přifázování a následném najíždění se totiž mohou značně měnit napěťové poměry v místě připojení zdroje, což může vést k požadavku na regulaci jalového výkonu během tohoto procesu. Velká hodnota časové konstanty TC_QU by mohla vést k nechtěné nestabilitě regulace během tohoto přechodového procesu. Naopak správně zvolená (řekněme větší) časová konstanta TC_QU během dalšího provozu zdroje může být žádoucí a opodstatněná požadavkem na plynulost regulace $Q = f(U)$. Proto jsou na vstup selektoru (prvek Two Input Selector) přivedeny signál parametru TC_QU_MF , který je uživatelsky nastavitelný a který se skrze parametr TC_QU uplatní po najetí zdroje na požadované parametry výkonu, a signál označený v popisu prvku konstanty jako TC_QU_M0 o hodnotě 0,01, který se uplatní během fázování a najíždění. (M0 v názvu konstanty TC_QU_M0 znamená označení mód 0, což je mód řízení zajišťující fázovací proces zdroje. Popisu módů řízení je uvedeno v kapitole F03 – Volič módů.) O použití správné hodnoty pro časovou konstantu TC_QU tedy rozhoduje prvek výběru (prvek Two Input Selector), který je ovládán výstupem komparátoru (prvek Two Input Comparator). Komparátor mění svou výstupní hodnotu v okamžiku, kdy je signál $StFF$ menší než 0. Signál $StFF$ (Steps to Finish Phasing) je celočíselná proměnná (integer), která je počítána v komponentě $DG_control_rampRuler$ (v rámci funkce F02 – Výběr a rampa požadovaných P a Q) a určuje počet kroků výpočtu (Time Step), které zbývají do konce najetí zdroje po přifázování.

Další návaznost výstupního signálu je uvedena v popisu funkce F02 – Výběr a rampa požadovaných P a Q.

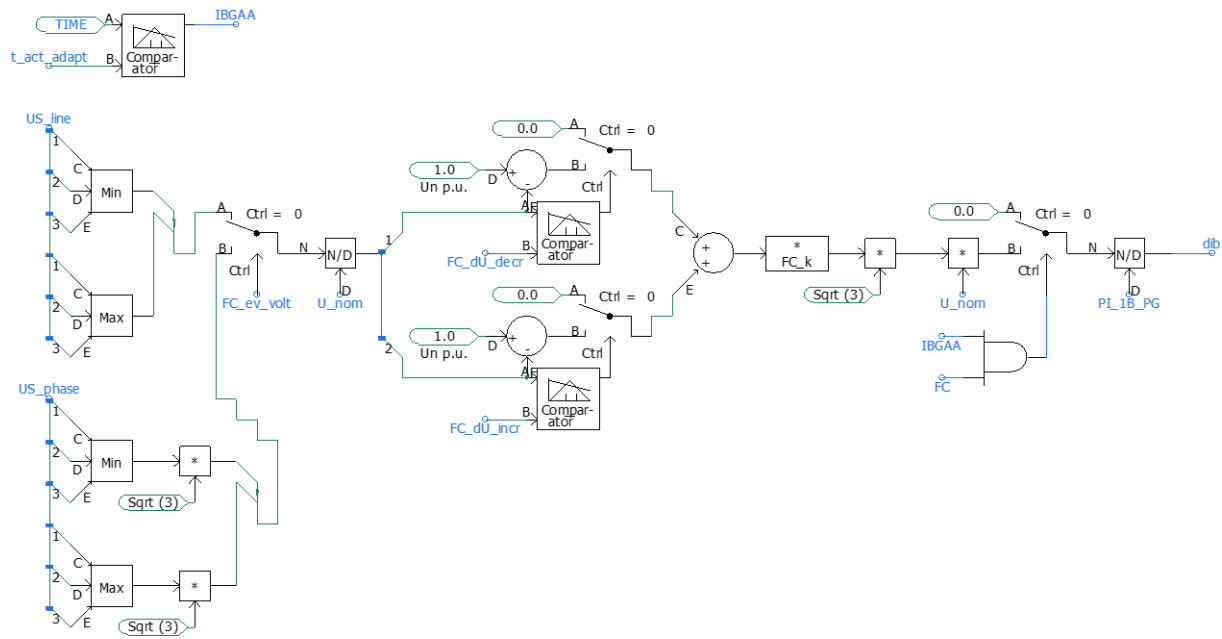
Uživatelské nastavení je realizováno:

- v (2.) záložce *Power curves*,
 - skupině $Q(U)$ mode,
 - parametr $Q(U)$ mode – QU_mode ,
 - parametr $U(Q_{max}) \%Un$ – U_Qmax ,
 - parametr $U(Q_{0L}) \%Un$ – U_Q0L ,
 - parametr $U(Q_{0P}) \%Un$ – U_Q0P ,
 - parametr $U(-Q_{max}) \%Un$ – U_nQmax ,
 - parametr *Time constant* – TC_QU_MF .

F17 – Rychlý poruchový proud

Funkce rychlého poruchového proudu je jednou z funkcí, které jsou implementovány do řídicího algoritmu NVM z důvodu realizace jeho schopnosti chovat se v případě poklesů a nárůstů napětí v soustavě, danými poruchami, podobně jako SVM. Funkce patří do kategorie volitelných funkcí.

Na obr. 10-22 je uvedeno schéma následované popisem schématu a popisem uživatelského nastavení.



obr. 10-22: Schéma funkce F17 – Rychlý poruchový proud

Počáteční volbou uživatele je, jestli bude pro změnu napětí vyhodnocována sdružená (*US_line*) nebo fázová (*US_phase*) hodnota napětí – jde o volbu *FC_ev_volt*. Prvek volby (prvek Two Input Selector) tak propustí dvourozměrový signál s informací o minimu, resp. maximu vybrané sdružené nebo fázové hodnoty napětí se kterými se dále pracuje v poměrné hodnotě (dělení hodnotou nominálního napětí zdroje – *U_nom*). Obě hodnoty jsou dále porovnány s uživatelem nastavenou hodnotou *FC_dU_decr*, resp. *FC_dU_incr*, které definují prahové hodnoty pro inicializaci výstupu odchylky napětí. Odchylka je dále zesílena parametrem *FC_k* – koeficientem vyjadřujícím dosah proudu jalového charakteru (dle PPDS v rozsahu 2 až 6), přepočtena na sdruženou hodnotu napětí a vzata do podílu s hodnotou *PI_IB_PG* (nastavitelnou v rámci funkce F08 – Parametry RO – IBG), což je uživatelsky nastavená proporcionální konstanta PI regulátoru vnější výkonové smyčky regulace výkonu zdroje, která pro funkci rychlého poruchového proudu přepočítává jeho výstupní požadavek na poměrově správnou hodnotu jalového výkonu. Výstupní signál reprezentující požadavek na změnu jalového výkonu zdroje – *dib* je realizován (je nenulový) pouze při splnění podmínky uplynutí uživatelem nastaveného času pro inicializaci funkce – *t_act_adapt* a zároveň povolením realizace výstupu dané funkce skrze proměnnou *FC* – volba „yes“.

Výstup funkce se uplatní v rámci funkce F04 – Řízení IBG - slave.

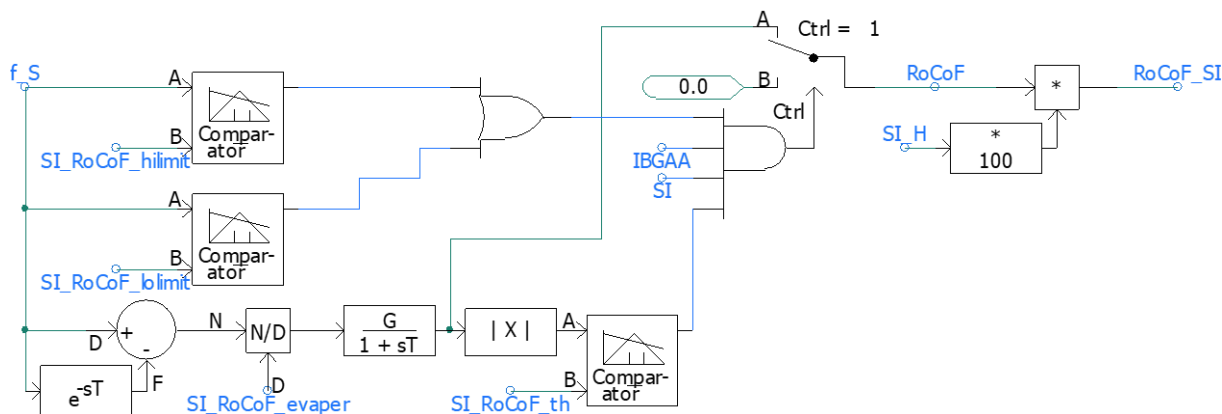
Uživatelské nastavení je realizováno:

- v (3.) záložce *IBG adaptation*,
 - skupině *All general*,
 - parametr *Activation time* – *t_act_adapt*,
 - skupině *Fault Current*,
 - parametr *Allow fault current* – *FC*,
 - parametr *Current factor (k)* – *FC_k*,
 - parametr *Evaluated voltage* – *FC_ev_volt*,
 - parametr *Threshold value decrease* – *FC_dU_decr*,
 - parametr *Threshold value increase* – *FC_dU_incr*.

F18 – Umělá setrvačnost

Funkce umělé setrvačnosti je jednou z funkcí, které jsou implementovány do řídicího algoritmu NVM z důvodu realizace jeho schopnosti chovat se v případě změn frekvence v soustavě podobně jako SVM. Funkce patří do kategorie volitelných funkcí.

Na obr. 10-23 je uvedeno schéma následované popisem schématu a popisem uživatelského nastavení.



obr. 10-23: Schéma funkce F18 – Umělá setrvačnost

Algoritmus výpočtu rychlosti změny frekvence začíná vyhodnocením odchylky aktuální frekvence – f_S od frekvence před časem uživatelsky nastaveným jako časové okno pro výpočet rychlosti změny frekvence – SI_RoCoF_evaper . Obvykle bývá nastaveno v rozmezí 2 až 40 period, což odpovídá času 0,04 až 0,80 sekundy. Tato proměnná je vnitřním parametrem prvku časového zpoždění (prvek Delay) a zároveň realizuje poměr dané změny před vstupem signálu do přenosové funkce (prvek Real Pole), jehož vnitřní proměnné jsou hodnota zesílení – SI_RoCoF_Fgain a časová konstanta – $SI_RoCoF_Ftimecons$. Výstupní signál tohoto úseku algoritmu je označen jako signál $RoCoF$ a po vynásobení proměnnou reprezentující uživatelsky nastavenou setrvačnost – SI_H , která má být použita, dle PPDS v rozsahu 2 až 6 s tvoří výstupní signál této funkce – $RoCoF_SI$. Výstupní signál bude nenulový v případě splnění čtyř podmínek. Jde o překročení nebo podkročení uživatelem nastavené frekvence pro aktivaci funkce – $SI_RoCoF_hilimit$, resp. $SI_RoCoF_lolimit$, splnění podmínky uplynutí uživatelem nastaveného času pro inicializaci funkce – t_{act_adapt} reprezentované proměnnou $IBGAA$ (viz popis algoritmu funkce F17 – Rychlý poruchový proud), povolení realizace výstupu dané funkce skrze proměnnou SI – volba „yes“ a překročení uživatelem nastavené prahové hodnoty změny frekvence – SI_RoCoF_th , obvykle volenou v rozmezí 0,1 až 1,2 Hz/s.

Výstup funkce se uplatní v rámci funkce F04 – Řízení IBG - slave.

Uživatelské nastavení je realizováno:

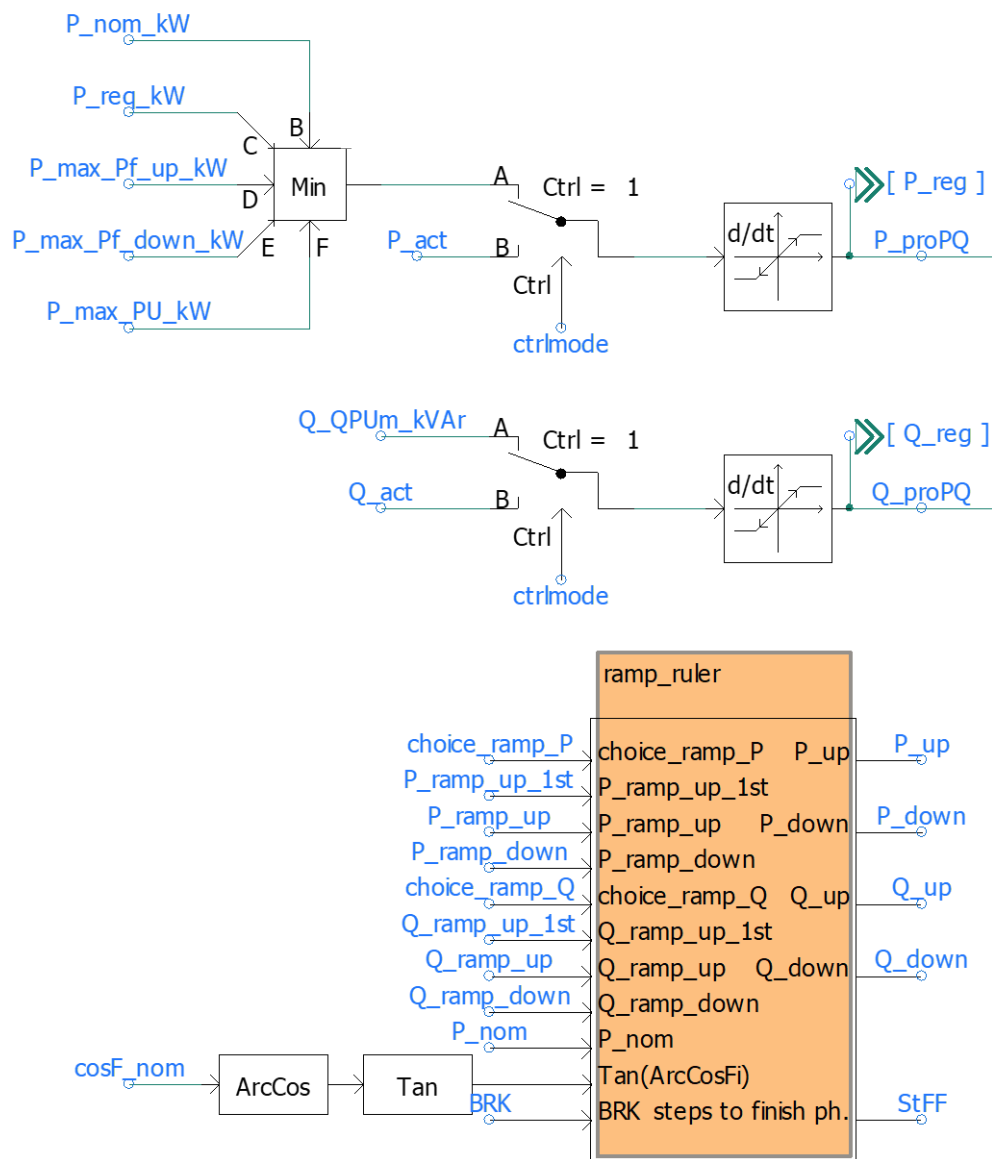
- v (3.) záložce *IBG adaptation*,
 - skupině *All general*,
 - parametr *Activation time* – t_{act_adapt} ,
 - skupině *Synthetic Inertia*,
 - parametr *Allow synthetic inertia* – SI ,
 - parametr *Inertia (H)* – SI_H ,
 - parametr *RoCoF evaluation period* – SI_RoCoF_evaper ,
 - parametr *RoCoF threshold value (beta)* – SI_RoCoF_th ,

- parametr *RoCoF f- limit* – *SI_RoCoF_lolimit*,
- parametr *RoCoF f+ limit* – *SI_RoCoF_hilimit*,
- parametr *RoCoF filter gain* – *SI_RoCoF_Fgain*,
- parametr *RoCoF filter time constant* – *SI_RoCoF_Ftimecons*.

F02 – Výběr a rampa požadovaných P a Q

Funkce výběru požadovaného činného a jalového výkonu je důležitá pro funkci navazujících regulačních obvodů/algorithmů. K výběru dochází nejen na základě priorit funkcí, které se mohou ve výběru uplatnit, ale i s ohledem na provozní stav modelu zdroje – mód. S volbou požadovaných výkonů je spojena i funkce ramp – maximálních možných gradientů nárůstů a poklesů požadavků.

Na obr. 10-24 je uvedeno schéma následované popisem schématu a popisem uživatelského nastavení.



obr. 10-24: Schéma funkce výběru a rampa požadovaných P a Q

Formování signálu pro samotný regulátor výkonu zdroje začíná pro činný výkon funkcí výběrem minima. Do výběru vstupují signály:

- P_{nom_kW} – nominální výkon zdroje generovaný funkcí F01 – Nominální a požadovaný P,
- P_{req_kW} – požadovaný výkon zdroje zadaný uživatelem, zpracovaný funkcí F01 – Nominální a požadovaný P,
- $P_{max_Pf_up_kW}$ – maximální výkon omezený funkcí F13 – $P = f(f+)$,
- $P_{max_Pf_down_kW}$ – maximální výkon omezený funkcí F12 – $P = f(f-)$ a
- $P_{max_PU_kW}$ – maximální výkon omezený funkcí F14 – $P = f(U)$.

Všechny tyto signály jsou v jednotkách kW. Výstup výběru min. se uplatní pouze v módu 1, což je výkonový mód (viz F03 – Volič módů), a tedy stav, kdy zdroj musí regulovat svůj výkon na základě daných požadavků dodávky činného a jalového výkonu. To zajišťuje výběrový člen (prvek Two Input Selector) ovládaný signálem *ctrlmode*, jež je tvořen v rámci funkce F03 – Volič módů a rozhoduje o chování zdroje v různých režimech provozu zdroje a sítě. Pokud není dosaženo výkonového provozu, je výstupem žádané hodnoty signál P_{act} – aktuální činný výkon zdroje, čímž je realizován režim sledování pro část regulačního obvodu zpracovávajícího regulační odchylku žádaného a skutečného činného výkonu zdroje. Poslední ve sledu je prvek gradientu (prvek Rate Limiter), který pracuje s parametry P_{up} – hodnota gradientu nárůstu žádaného výkonu v jednotkách kW/s a P_{down} – hodnota gradientu poklesu žádaného výkonu ve stejných jednotkách. Oba tyto parametry jsou výstupem definice *DG_control_rampRuler*, který je popsán dál v této podkapitole. Výstupním signálem pro regulátor výkonu zdroje je signál P_{proPQ} . Tento signál slouží také pro účely funkce F15 – $Q = f(P)$ – udává aktuální požadovaný výkon zdroje. Signál P_{reg} je použit pro možnost exportu informace ven z modulu na plátno, kde je model zdroje umístěn.

O hodnotě požadovaného jalový výkonu je již rozhodnuto v rámci funkcí F15 – $Q = f(P)$ a F16 – $Q = f(U)$ jejichž výstupem je právě signál Q_{QPUM_kVAr} . Stejně jako u požadované hodnoty činného výkonu následuje proces ověření výkonového provozu v bloku výběru (prvek Two Input Selector) za pomoci signálu *ctrlmode* s případnou volbou Q_{act} – aktuálního jalového výkonu zdroje pro režim sledování části regulačního obvodu zpracovávajícího regulační odchylku žádaného a skutečného činného výkonu zdroje. prvek gradientu (prvek Rate Limiter) pracuje s parametry Q_{up} a Q_{down} získanými také z definice *DG_control_rampRuler*. Výstupním signálem pro regulátor výkonu zdroje je signál Q_{proPQ} . Signál Q_{reg} je použit pro možnost exportu informace ven z modulu na plátno, kde je model zdroje umístěn.

Další návaznost výstupního signálu je uvedena v popisu funkce F04 – Řízení IBG - slave.

definice *DG_control_rampRuler*

Definice *DG_control_rampRuler* určuje gradienty/rampy nárůstů a poklesů žádaných hodnot činného a jalového výkonu v různých provozních stavech zdroje.

V prvním kroku simulace jsou na výstupy definice přiřazeny hodnoty gradientů, které budou platné až do dosažení žádané hodnoty činného výkonu v požadavku na velikost činného výkonu. (Tedy ne až do dosažení skutečného činného výkonu zdroje hodnoty žádaného činného výkonu, ale do dosažení konce rampy v požadavku na velikost činného výkonu zdroje – signál P_{proPQ} , resp P_{reg} .) Díky tomuto opatření je možné uživatelsky zvolit rampy první změny výkonu – najetí, jinak než rampy po zbytek průběhu simulace a tím dosáhnout rychlejšího najetí zdroje. Výstupu P_{up} je v tomto procesu přiřazena hodnota $P_{ramp_up_1st}$, výstupu P_{down} hodnota P_{ramp_down} a výstupu Q_{up} hodnota $Q_{ramp_up_1st}$. V závislosti na nastavení volby *choice_ramp_P*, pomocí které uživatel volí jednotky gradientu činného výkonu – „%Pn/s“ (s využitím signálu P_{nom}) nebo „kW/s“ poté dochází k případnému přepočtu hodnoty P_{up} na

jednotku kW/s. U signálu Q_{up} dochází ve stejném výpočetním kroku k případnému přepočtu na základě volby $choice_ramp_Q$, pomocí které uživatel volí jednotky gradientu jalového výkonu - %Pn/s nebo kW/s nebo volbu stejného gradientu, který byl určený pro žádanou hodnotu činného výkonu nebo možnost výpočtu gradientu požadovaného jalového výkonu na základě nominálního účinku $cosF_{nom}$. Výstupu Q_{down} je pak přiřazena stejná hodnota gradientu jako signálu Q_{up} z důvodu ošetření možnosti dosahovat s požadovaným gradientem žádané hodnoty jak induktivnímu (zápornému), tak kapacitnímu (kladnému) jalovému výkonu. Poslední příkaz v úvodní podmínce (prvním kroku simulace) je přiřazení vypočtené celočíselné proměnné parametru $steps_phasing$, která definuje počet výpočetních kroků ($delt$) pro dosažení nominálního výkonu zdroje (P_{nom}) pro konkrétní zvolenou rampu ($P_{ramp_up_1st}$).

Při dosažení platnosti druhé podmínky – přiřazování, které je definováno změnou stavu zdrojového vypínače z rozepnuto ($BRK = 1$) na sepnuto ($BRK = 0$) začne algoritmus v každém výpočetním kroku odečítat hodnotu 1 od parametru $steps_phasing$. V rámci celé simulace to znamená, že došlo k přiřazování zdroje a začíná jeho najíždění na požadované parametry. Tento proces bude ukončen nejpozději při dosažení nulové hodnoty parametru $steps_phasing$.

Poslední blok příkazů je inicializován dosažením potencionálního najetí zdroje na nominální výkon – parametr $steps_phasing = 0$. Od tohoto okamžiku až do konce simulace jsou proměnným definujícím gradienty výkonů přiřazeny hodnoty na základě volby uživatele. Výstupu P_{up} je přiřazena hodnota P_{ramp_up} , výstupu P_{down} hodnota P_{ramp_down} , obě případně přepočítány na základě volby jednotek $choice_ramp_P$. Výstupům Q_{up} , resp. Q_{down} jsou přiřazeny hodnoty Q_{ramp_up} , resp. Q_{ramp_down} při volbě $choice_ramp_Q$ „kW/s“, přepočítané hodnoty stejných parametrů v případě volby „%Pn/s“, stejné hodnoty jako P_{up} , resp. P_{down} při volbě „same as P“ nebo tak, aby poměr gradientu jalového výkonu (nahoru i dolů) vzhledem k nominální hodnotě jalového výkonu (na základě přepočtu nominální hodnoty účinku $cosF_{nom}$ byl stejný jako poměr gradientu činného výkonu (nahoru i dolů) vzhledem k nominální hodnotě činného výkonu, při volbě „based on cosFin“.

Je patrné, že příkazy uplatněné v prvním kroku simulace a příkazy z posledního bloku příkazů jsou provedeny vždy jen jednou během simulace. Takovým řešením nedochází k výpočtům v každém kroku a tím je šetřen výpočtový čas. Definované parametry jsou v každém kroku vždy jen načítány a ukládány.

Zdrojový kód definice $DG_control_rampRuler$:


```

#include 's1.h'
#include 'emtstor.h'
#LOCAL INTEGER stepsF
#LOCAL REAL Pu, Pd, Qu, Qd

stepsF = STORI(NSTORI)
Pu = STORF(NSTORF)
Pd = STORF(NSTORF + 1)
Qu = STORF(NSTORF + 2)
Qd = STORF(NSTORF + 3)

IF (time == delt) THEN
    Pu = $P_ramp_up_1st
    Pd = $P_ramp_down
    Qu = $Q_ramp_up_1st
    IF (choice_ramp_P == 0) THEN
        Pu = $P_ramp_up_1st * 0.01 * P_nom
        Pd = $P_ramp_down * 0.01 * P_nom
    ENDIF
    IF (choice_ramp_Q == 0) THEN
        Qu = $Q_ramp_up_1st * 0.01 * P_nom
    ELSE IF (choice_ramp_Q == 2) THEN
        Qu = Pu
    ELSE IF (choice_ramp_Q == 3) THEN
        Qu = $TanArcCosFi * Pu
    ENDIF
    Qd = Qu
    stepsF = P_nom / Pu / delt
ENDIF

IF (BRK == 0) THEN
    stepsF = stepsF - 1
    IF (stepsF <= -5) THEN
        stepsF = stepsF + 1
    ENDIF
ENDIF

IF (stepsF == 0) THEN
    Pu = $P_ramp_up
    Pd = $P_ramp_down
    Qu = $Q_ramp_up
    Qd = $Q_ramp_down
    IF (choice_ramp_P == 0) THEN
        Pu = $P_ramp_up * 0.01 * P_nom
        Pd = $P_ramp_down * 0.01 * P_nom
    ENDIF
    IF (choice_ramp_Q == 0) THEN
        Qu = $Q_ramp_up * 0.01 * P_nom
        Qd = $Q_ramp_down * 0.01 * P_nom
    ELSE IF (choice_ramp_Q == 2) THEN
        Qu = Pu
        Qd = Pd
    ELSE IF (choice_ramp_Q == 3) THEN
        Qu = $TanArcCosFi * Pu
        Qd = $TanArcCosFi * Pd
    ENDIF
ENDIF

$P_up = Pu
$P_down = Pd
$Q_up = Qu
$Q_down = Qd
$steps_phasing = stepsF

STORI(NSTORI) = stepsF
STORF(NSTORF) = Pu
STORF(NSTORF + 1) = Pd
STORF(NSTORF + 2) = Qu
STORF(NSTORF + 3) = Qd

NSTORI = NSTORI + 1
NSTORF = NSTORF + 4

```

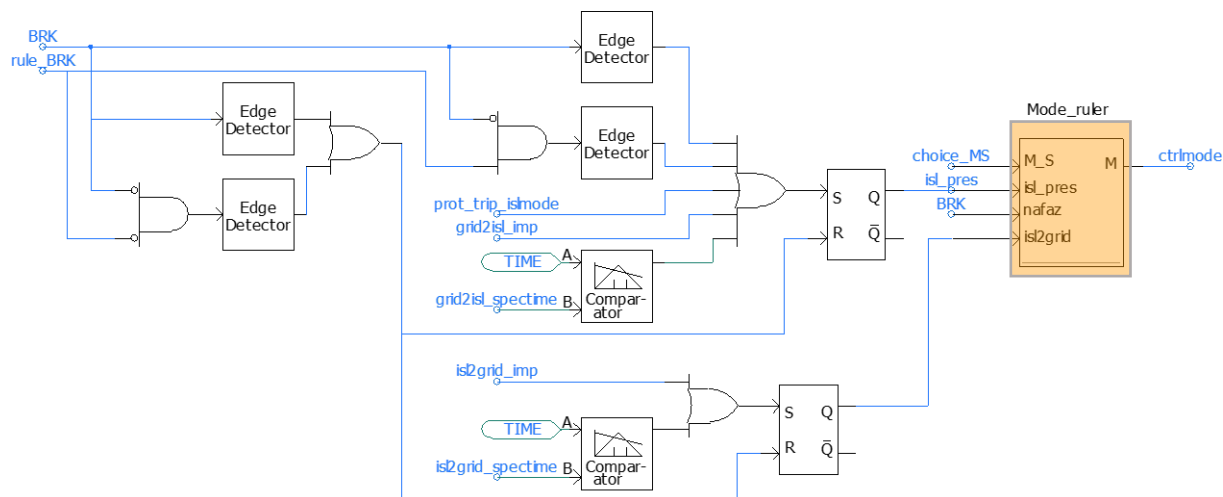
Uživatelské nastavení je realizováno:

- v (1.) záložce *Configuration*,
 - skupině *Nominal parameters*,
 - parametr *Nominal power* – P_{nom} ,
- v (2.) záložce *Power curves*,
 - skupině *Q(P) mode*,
 - parametr *Nominal cosFi* – $cosF_{nom}$,
- v (4.) záložce *Synchronization & Ramps*,
 - skupině *P ramps*,
 - parametr *Unit selection for P ramp* – $choice_ramp_P$,
 - parametr *Power increase rate (1st run-up)* – $P_ramp_up_1st$,
 - parametr *Power increase rate (rest)* – P_ramp_up ,
 - parametr *Power decrease rate (rest)* – P_ramp_down ,
 - skupině *Q ramps*,
 - parametr *Calculation selection for Q ramp* – $choice_ramp_Q$,
 - parametr *Power increase rate (1st run-up)* – $Q_ramp_up_1st$,
 - parametr *Power increase rate (rest)* – Q_ramp_up ,
 - parametr *Power decrease rate (rest)* – Q_ramp_down ,
- v (5.) záložce *Measurement*,
 - skupině *Outputs*,
 - parametr *P requested for regulator of P* – P_{reg} ,
 - parametr *Q requested for regulator of Q* – Q_{reg} .

F03 – Volič módů

Regulační módy VM tak, jak jsou popsány v rámci kapitoly 9.1.5 – F03 – Určení regulačního módu (na straně 146) jsou řešeny v rámci této funkce. Výstupem funkce F03 je tak konkrétní regulační mód – signál *ctrlmode*, podle kterého je model VM provozován.

Na obr. 10-25 je uvedeno schéma následované popisem schématu a popisem uživatelského nastavení.



obr. 10-25: Schéma funkce F03 – Volič módů

Ústředním prvkem je definice *DG_control_mods*, jejíž konfigurace vstupů určuje výsledný, použitý regulační mód – *ctrlmode*. Signál přivedený na vstup definice s označením *isl_pres* reprezentuje hodnotou logické jedničky existenci ztráty sítě – Loss of Mains. Ta je inicializována buď odepnutím vypínače zdroje – signálem *BRK* nebo odepnutím vypínače agenta nastaveného pro externí komunikaci – *rule_BRK* nebo povelu ochran příslušících a nastavených pro daný zdroj pro přechod do ostrovního provozu – *prot_trip_islmode* nebo povelu uživatele skrze proměnnou *grid2isl_imp* nebo impulzem iniciovaným v uživateli nastaveném čase skrze proměnnou *grid2isl_spectime*. Výstup klopného obvodu SR je těmito signály uveden do stavu logické jedničky. Reset klopného obvodu je iniciován zpětným sepnutím vypínače zdroje nebo vypínače spárovaného agenta. Signál přivedený vstup definice označený jako *isl2grid* má hodnotu logické jedničky v případě povelu uživatele k přechodu z ostrovního provozu skrze proměnnou *isl2grid_imp* nebo po překročení uživatelem nastaveném čase povelu iniciace přechodu z ostrovního provozu – *isl2grid_spectime*. Reset příslušného klopného obvodu je opět iniciován zpětným sepnutím vypínače zdroje nebo vypínače spárovaného agenta.

definice *DG_control_mods*

Výstupní signál této definice může nabývat vždy jedné z celočíselných hodnot 0 až 3. Regulační módy jsou popsány v kapitole F03 – Určení regulačního módu (strana 146). Signál přivedený na vstup *M_S* – signál *choice_MS* je uživatelskou volbou nastavující chování, resp. požadovaný regulační mód v případě synchronního provozu a provozu ostrovního. Volbami jsou „Slave / Slave“, „Slave / Master“ a „Master / Master“ definující chování VM v synchronním provozu / ostrovním provozu.

Signál přivedený na vstup *isl_pres* informuje o prezenci ostrovního provozu. Logická jednička přivedená na tento vstup prakticky znamená změnu regulačního módu do stavu *ctrlmode* = 2 v případě, že volba *choice_MS* nabývá požadavku master v ostrovním provozu. Jinak zůstává VM v současném regulačním módu.

Signál *BRK* přivedený na vstup *nafaz* je využit jako informace o stavu fázování. Změnou jeho hodnoty z jedna na nula je ukončen regulační mód *ctrlmode* = 0, který je používán pro fázování na síť při startu zdroje.

Signál přivedený na vstup *isl2grid* je povel pro přechod z ostrovního na synchronní provoz. Prakticky je tak změněn regulační mód na *ctrlmode* = 3, který řeší regulaci tak, aby došlo ke splnění fázovacích podmínek v místě vypínače spojující síť, do které pracuje zdroj, se zbytkem soustavy/sítě.

Zdrojový kód definice *DG_control_rampRuler*:

```
#INCLUDE 's1.h'
#LOCAL INTEGER naf, Mig

naf = STORI(NSTORI)
IF (time == delt) THEN
    naf = 1
ENDIF

Mig = 1

IF (naf == 1 .AND. $nafaz == 1) THEN
    $M = 0
ELSE IF ($M_S == 0 .AND. $isl_pres == 0) THEN
    $M = 1
ELSE IF ($M_S == 0 .AND. $isl_pres == 1) THEN
    $M = 1
ELSE IF ($M_S == 1 .AND. $isl_pres == 0) THEN
    $M = 1
ELSE IF ($M_S == 1 .AND. $isl_pres == 1) THEN
    $M = 2
    Mig = 1
ELSE IF ($M_S == 2 .AND. $isl_pres == 0) THEN
    $M = 2
ELSE IF ($M_S == 2 .AND. $isl_pres == 1) THEN
    $M = 2
    Mig = 1
ENDIF

IF (time == 0) THEN
    $M = 0
ENDIF

STORI(NSTORI) = naf
NSTORI = NSTORI + 1
```

Výstup funkce se uplatní v celé řadě návazností v rámci regulací. Konkrétně ve funkcích F04 – Řízení IBG - slave, F05 – Řízení IBG - master – obvod napětí, F06 – Řízení IBG - master – obvod frekvence, F07 – Řízení SG, F02 – Výběr a rampa požadovaných P a Q a F08 – Parametry RO – IBG.

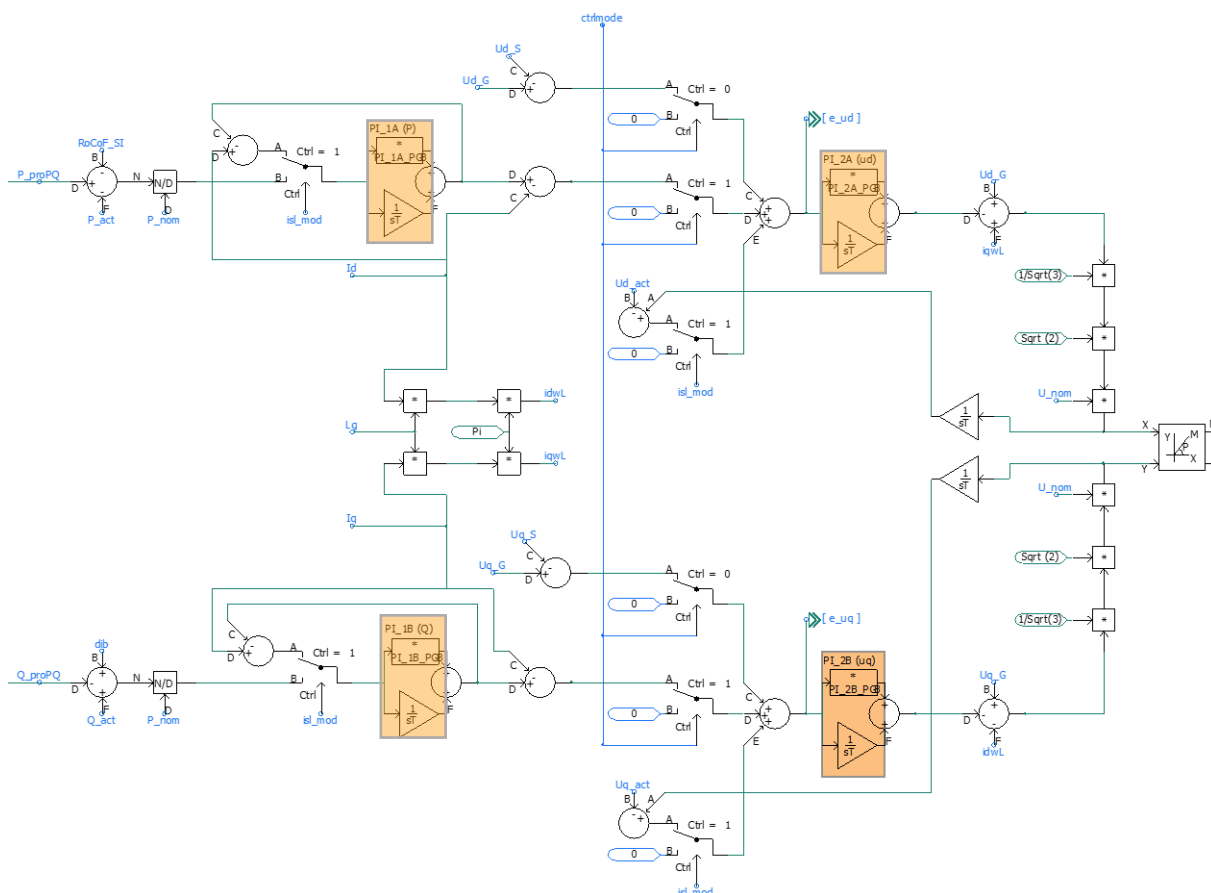
Uživatelské nastavení je realizováno:

- v (1.) záložce *Configuration*,
 - skupině *Nominal parameters*,
 - parametr *Control mode* – *choice_MS*,
- v (4.) záložce *Master & Island setting*,
 - skupině *Transitions*,
 - parametr *External island to grid command - impulse* – *isl2grid_imp*,
 - parametr *Spec. time of isl. to grid transition* – *isl2grid_spectime*,
 - parametr *External grid to island command - impulse* – *grid2isl_imp*,
 - parametr *Spec. time of grid to isl. transition* – *grid2isl_spectime*.

F04 – Řízení IBG - slave

Základní schéma řízení, které je použito v *modulu řízení IBG* je uvedeno a popsáno v rámci kapitoly Řízení IBG (součást kapitoly 3.3.3, strana 95). Schéma bylo modifikováno s ohledem na požadované vlastnosti regulací modelů VM. Jedná se zejména o obvod zpracování požadované hodnoty a regulační odchylky, regulaci při fázování VM a realizaci režimů sledování, spolu s

návaznostmi na regulace v rámci ostrovního provozu. Regulační schéma je uvedeno na obr. 10-26 následované jeho popisem.



obr. 10-26: Schéma funkce F04 – Řízení IBG - slave

Regulační schéma se v podstatě odvíjí od schématu uvedeného na obr. 3-29 (strana 96). Vstupem funkce jsou signály P_{proPQ} a Q_{proPQ} , které jsou výstupy funkce F02 – Výběr a rampa požadovaných P a Q a aktuální hodnoty činného a jalového výkonu – P_{act} a Q_{act} , přicházející z modulu měření. Součástí obvodu tvorby regulační odchylky mohou být také signál $RoCoF_{SI}$, který je výstupem funkce F18 – Umělá setrvačnost a signál dib , který je výstupem funkce F17 – Rychlý poruchový proud. Obě vzniklé regulační odchylky jsou přepočteny na poměrnou hodnotu podle hodnoty nominálního výkonu VM P_{nom} . Vnější výkonová smyčka následně určí požadované hodnoty výstupního proudu v dq souřadnicovém systému a porovnáním s jejich skutečnými hodnotami – Id a Iq jsou uplatněny jako vstup vnitřní proudové smyčky. Tyto regulační odchylky se uplatní pouze v případě regulačního režimu $ctrlmode = 1$ – v PQ výkonovém režimu VM. Parametry proporcionálního zesílení a časových konstant regulátorů vnější smyčky jsou dány proměnnými PI_{1A_PG} , PI_{1A_ITC} , PI_{1B_PG} a PI_{1B_ITC} , které jsou výstupem funkce F08 – Parametry RO – IBG.

V režimu fázování – $ctrlmode = 0$, jsou pro vnitřní regulační smyčku uplatněny regulační odchylky odvíjející se od rozdílů příslušných dq složek napětí zdroje a sítě – Ud_S , Ud_G , Uq_S , Uq_G . Výstupy regulátorů vnitřních smyček jsou odečteny od složkových napětí sítě (Ud_G , resp. Uq_G) a úbytku napětí na impedanci modelu samotného zdroje ($iqwL$, resp. $idwL$). Následuje přepočet požadovaných složkových napětí na fázor skutečné požadované velikosti okamžité hodnoty fázového napětí, který je dále vstupem funkce F10 – Požadované napětí střídače. Parametry proporcionálního zesílení a časových konstant regulátorů vnitřní smyčky jsou dány

Consumption) – nedojde k sepnutí vypínače zdroje a zdroj bude pracovat v režimu master v ostrově tvořeném právě jen vlastní spotřebou.

V případě režimu master (*ctrlmode* = 2) je výstup funkce regulován podle žádané hodnoty napětí. Regulační odchylka velikosti napětí je tvořena žádanou hodnotou napětí – *U_mas*, která je uživatelskou volbou, a která je zadána na základě volby *choice_Umas* buď v absolutní hodnotě efektivní hodnoty sdruženého napětí (volba „*Umas (kV)*“) nebo v poměrné hodnotě vzhledem k nominálnímu napětí zdroje – *U_nom* (volba „*Umas (pu/Un)*“) a napětím měřeným na výstupu zdroje – *Uavg_S* nebo napětím měřeným jinde v síti, na základě definice uživatele skrze proměnnou *U_rem*. Volba regulované veličiny je dána volbou *choice_Umas_bus* (volba „*PCC*“ pro *Uavg_S* nebo „*remote*“ pro *U_rem*).

V případě režimu resynchronizace (*ctrlmode* = 3) je výstup funkce regulován podle odchylky napětí v místě, kde má dojít k resynchronizaci. To je dáno v případě provozu na vlastní spotřebu signálem *dU*, který reprezentuje rozdíl velikostí napětí před a za vypínačem daného zdroje nebo v případě ostrovního provozu signálem *rule_dU*, který reprezentuje rozdíl velikostí napětí na levé a pravé straně příslušného agenta. Volba se odvíjí od polohy vypínače zdroje – signál *BRK*.

V případě, že platí regulační mód *ctrlmode* = 0 nebo 1, je regulátor v režimu sledování – reguluje podle hodnoty napětí, která je výstupem funkce F04 – Řízení IBG - slave – podle signálu *U_req_mag*.

Výstupní signál regU je uplatněn ve funkci F10 – Požadované napětí střídače.

definice *DG_control_modeconverter*

Tato definice mění hodnotu regulačního módu při fázování zdroje z hodnoty *ctrlmode* = 0 na *ctrlmode* = 2 v případě, kdy je zvolen start zdroje do vlastní spotřeby. Vše proto, aby byla realizována regulace daného procesu pomocí regulátoru funkce F05.

Zdrojový kód definice *DG_control_modeconverter*:

```
#INCLUDE 's1.h'

$o_CMsuit = $i_ctrlmode
IF ($i_start == 1 .AND. $i_ctrlmode == 0) THEN
    $o_CMsuit = 2
ENDIF
```

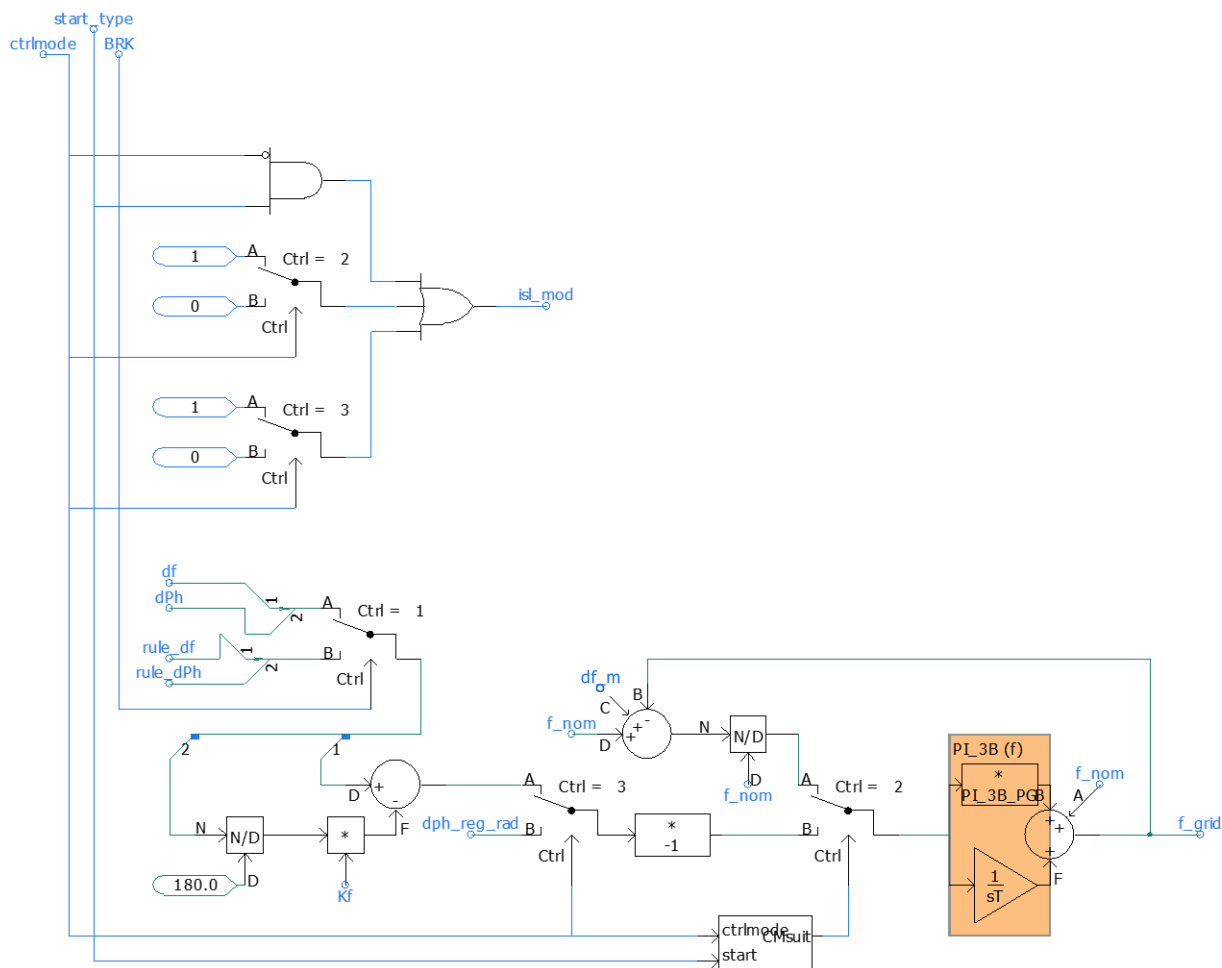
Uživatelské nastavení je realizováno:

- v (1.) záložce *Configuration*,
 - skupině *Nominal parameters*,
 - parametr *Nominal voltage (kV)* – *U_nom*,
 - skupině *Required parameters*,
 - parametr *Required master voltage input* – *choice_Umas*,
 - parametr *Required master voltage* – *U_mas*,
 - parametr *Tracked bus* – *choice_Umas_bus*,
 - parametr *Remote variable* – *U_rem*.

F06 – Řízení IBG - master – obvod frekvence

Funkce F06 je realizována pro určení požadované velikosti frekvence v případě regulace VM v režimu master.

Na obr. 10-28 je uvedeno schéma následované popisem schématu a popisem uživatelského nastavení.



obr. 10-28: Schéma funkce F06 – Řízení IBG - master – obvod frekvence

V horní části schématu je realizován algoritmus, který určuje skrze výstupní proměnnou *isl_mod* existenci ostrovního provozu zdroje. Ta je dána buď provozem na vlastní spotřebu (konfigurace proměnných *start_type* a *ctrlmode*) nebo regulačním režimem master (*ctrlmode* = 2) nebo regulačním režimem resynchronizace (*ctrlmode* = 3).

Ve spodní části schématu je uveden samotný regulační obvod realizovaný PI regulátorem, jehož parametry proporcionálního zesílení a časové konstanty jsou dány proměnnými *PI_3B_PG* a *PI_3B_ITC*, které jsou výstupem funkce F08 – Parametry RO – IBG. Vstup regulátoru se odvíjí od stavu proměnných *ctrlmode*, *start_type* a *BRK*. Součástí algoritmu je i definice *DG_control_modeconvertor*, která řeší návaznost volby typu startu VM, a která je spolu s proměnnými *ctrlmode*, *start_type* a *BRK* v kontextu vazby k této funkci popsána v rámci popisu funkce F05 – Řízení IBG - master – obvod napětí.

V případě režimu master (*ctrlmode* = 2) je výstup funkce regulován podle žádané hodnoty frekvence. Regulační odchylka velikosti frekvence je tvořena žádanou, resp. nominální hodnotou frekvence – *f_nom*, která je uživatelskou volbou, velikostí signálu *df_m* a zpětnou vazbou výstupu regulátoru. Tvorba signálu *df_m* je popsána pod obr. 10-29.

V případě režimu resynchronizace (*ctrlmode* = 3) je výstup funkce regulován podle odchylky fáze napětí a frekvence v místě, kde má dojít k resynchronizaci. Místo resynchronizace je dáno

V případě, že platí regulační mód $ctrlmode = 0$ nebo 1 , je regulátor v režimu sledování – reguluje podle hodnoty signálu dph_reg_rad , který je dán algoritmem uvedeným v levé části obr. 10-29.

The block diagram illustrates the control system for a 2-DOF robot. It features two main feedback loops: a position loop and a velocity loop. The position loop uses a position feedback gain P_{act} and a velocity feedback gain P_{nom} . The velocity loop uses a velocity feedback gain P_{range} and a position feedback gain P_{res} . The system includes comparators for error signals, gain blocks (N/D, * 100, * 0.01), and integrators (1/s). The output is the motor drive signal df_m .

Obvod tvorby fáze posuvu má za úkol přesně určovat aktuální úhel fáze napětí pro režim sledování funkce F06 tak, aby byl zajištěn plynulý přechod do ostrovního provozu. O to se stará algoritmus skrytý v definici *DG_control_angles*, jehož vstupními signály jsou impulzy přechodů pil fázových závěsů *pll_theta_ABC* a *pll_theta_pevna* přes nulu. Tyto signály jsou tvořeny v rámci funkce F10 – Požadované napětí střídače. Je zde využita interpolační kompatibilita, která je popsána v příslušné kapitole na straně 115.

Zdrojový kód definice *DG_control_angles*:

```
IF ($dA < -PI_) THEN
    $dA = -PI_
ENDIF
```

```

IF ($stop == 1) THEN
    out = rcount - $TIC1 - $TIC2
    $dA = out * 50 * 360 / 180 * PI_
    rcount = 0
    ON = 0
ENDIF
STORF(NSTORF) = rcount
STORF(NSTORF + 1) = out
STORI(NSTORI) = ON
NSTORF = NSTORF + 2
NSTORI = NSTORI + 1

```

Algoritmus v pravé části obr. 10-29 definuje omezení pro regulaci činného výkonu v rámci režimu master. Výstupní signál *df_m* je uplatněn v obvodu regulace frekvence v módu 2 (*ctrlmode* = 2) funkce F06. Algoritmus vymezuje maximální změnu výkonu – *P_range* od zadané hodnoty výkonu pro vymezování maximální odchylky – *P_res*, v závislosti na změně frekvence s danou, uživatelsky nastavenou statikou – *droop_m*.

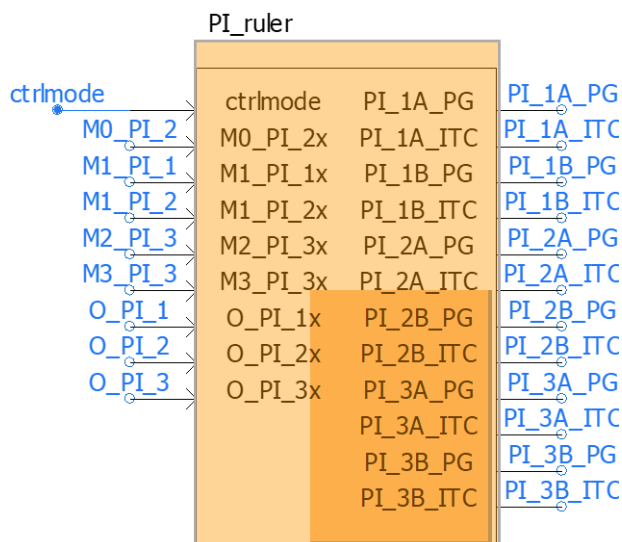
Uživatelské nastavení je realizováno:

- v (1.) záložce *Configuration*,
 - skupině *Nominal parameters*,
 - parametr *Nominal frequency (Hz)* – *f_nom*,
- v (4.) záložce *Master & Island setting*,
 - skupině *Master setup*,
 - parametr *Restriction* – *P_res*,
 - parametr *dP range* – *P_range*,
 - parametr *Droop m* – *droop_m*,
- v (6.) záložce *Synchronization & Ramps*,
 - skupině *Synchronization*,
 - parametr *Kf* – *Kf*.

F08 – Parametry RO – IBG

Funkce F08 určuje parametry proporcionálního zesílení a integrační časové konstanty pro všechny PI regulátory, které jsou uplatněny v rámci *modulu řízení IBG – M/S*. Výstupy funkce, která je dána definicí *DG_control_PI_IBG*, se tak uplatňují ve funkcích F04 – Řízení IBG - slave, F05 – Řízení IBG - master – obvod napětí a F06 – Řízení IBG - master – obvod frekvence. Pomocí této funkce je uživateli umožněno nastavit pro každý regulátor jeho parametry pro každý regulační mód.

Na obr. 10-30 je uvedeno schéma následované popisem schématu a popisem uživatelského nastavení.



obr. 10-30: Grafika a návaznosti funkce F08 – Parametry RO – IBG

definice DG_control_PI_IBG

Úkolem algoritmu definice je řazení nastavených hodnot požadovaných parametrů regulátorů v závislosti na regulačním módu. Je zde rozlišována oblast funkce, respektive regulačního režimu daného regulátoru a režimu sledování. Vstupní signály jsou čtyřrozměrná pole s uživatelsky nastavenými hodnotami parametrů regulátorů a výstupy jsou signály proměnných všech uplatněných regulátorů (v rámci funkcí F04, F05 a F06).

Zdrojový kód definice *DG_control_PI_IBG*:

```
#INCLUDE 's1.h'

IF ($ctrlmode == 0) THEN
    $PI_1A_PG = $O_PI_1x(1)
    $PI_1A_ITC = $O_PI_1x(2)
    $PI_1B_PG = $O_PI_1x(3)
    $PI_1B_ITC = $O_PI_1x(4)
    $PI_2A_PG = $M0_PI_2x(1)
    $PI_2A_ITC = $M0_PI_2x(2)
    $PI_2B_PG = $M0_PI_2x(3)
    $PI_2B_ITC = $M0_PI_2x(4)
    $PI_3A_PG = $O_PI_3x(1)
    $PI_3A_ITC = $O_PI_3x(2)
    $PI_3B_PG = $O_PI_3x(3)
    $PI_3B_ITC = $O_PI_3x(4)
ENDIF

IF ($ctrlmode == 1) THEN
    $PI_1A_PG = $M1_PI_1x(1)
    $PI_1A_ITC = $M1_PI_1x(2)
    $PI_1B_PG = $M1_PI_1x(3)
    $PI_1B_ITC = $M1_PI_1x(4)
    $PI_2A_PG = $M1_PI_2x(1)
    $PI_2A_ITC = $M1_PI_2x(2)
    $PI_2B_PG = $M1_PI_2x(3)
    $PI_2B_ITC = $M1_PI_2x(4)
    $PI_3A_PG = $O_PI_3x(1)
    $PI_3A_ITC = $O_PI_3x(2)
    $PI_3B_PG = $O_PI_3x(3)
    $PI_3B_ITC = $O_PI_3x(4)
ENDIF

IF ($ctrlmode == 2) THEN
    $PI_1A_PG = $O_PI_1x(1)
    $PI_1A_ITC = $O_PI_1x(2)
    $PI_1B_PG = $O_PI_1x(3)
    $PI_1B_ITC = $O_PI_1x(4)
    $PI_2A_PG = $O_PI_2x(1)
    $PI_2A_ITC = $O_PI_2x(2)
    $PI_2B_PG = $O_PI_2x(3)
    $PI_2B_ITC = $O_PI_2x(4)
    $PI_3A_PG = $M2_PI_3x(1)
    $PI_3A_ITC = $M2_PI_3x(2)
    $PI_3B_PG = $M2_PI_3x(3)
    $PI_3B_ITC = $M2_PI_3x(4)
ENDIF

IF ($ctrlmode == 3) THEN
    $PI_1A_PG = $O_PI_1x(1)
    $PI_1A_ITC = $O_PI_1x(2)
    $PI_1B_PG = $O_PI_1x(3)
    $PI_1B_ITC = $O_PI_1x(4)
    $PI_2A_PG = $O_PI_2x(1)
    $PI_2A_ITC = $O_PI_2x(2)
    $PI_2B_PG = $O_PI_2x(3)
    $PI_2B_ITC = $O_PI_2x(4)
    $PI_3A_PG = $M3_PI_3x(1)
    $PI_3A_ITC = $M3_PI_3x(2)
    $PI_3B_PG = $M3_PI_3x(3)
    $PI_3B_ITC = $M3_PI_3x(4)
ENDIF
```

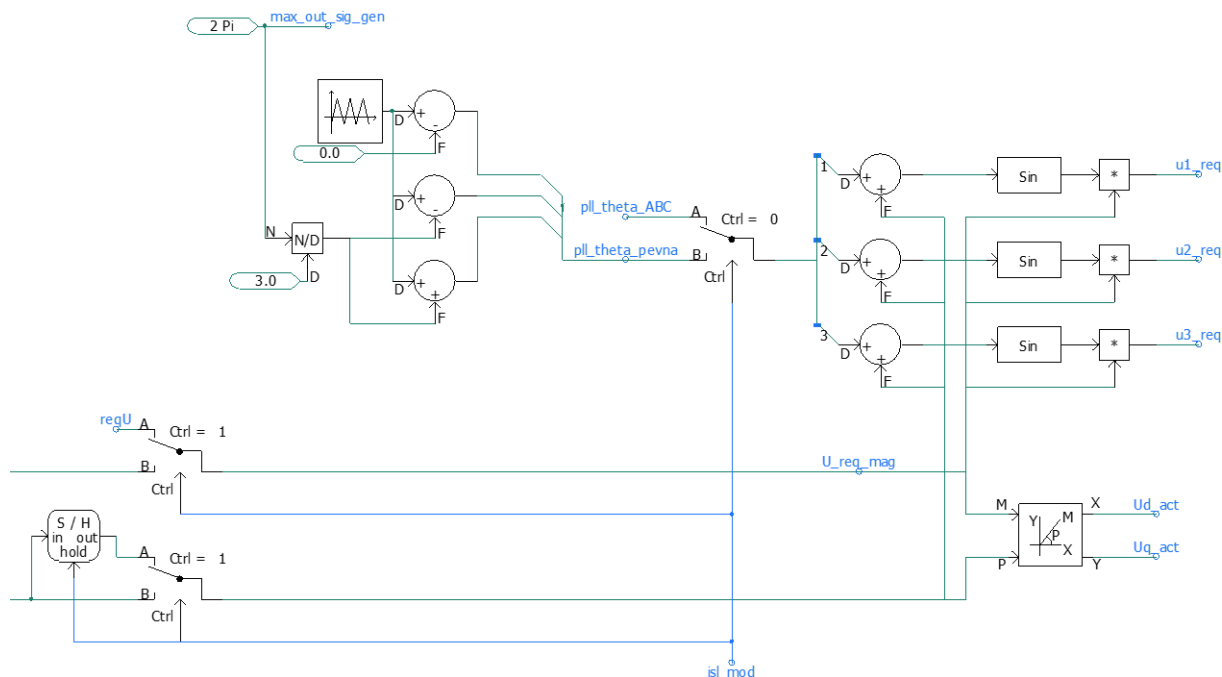
Uživatelské nastavení je realizováno:

- v (5.) záložce *PI setup*, ve všech zdejších (5) skupinách a (32) parametrech.

F10 – Požadované napětí střídače

Funkce F10 určuje požadované napětí střídače *modulu samotného zdroje* – IBG, potažmo požadované napětí zdroje v rámci *modulu samotného zdroje* – U . Hlavním výstupem tak jsou požadované okamžité hodnoty fázových výstupního napětí zdroje.

Schéma funkce je uvedeno na obr. 10-31 následované jeho popisem.



obr. 10-31: Schéma funkce F10 – Požadované napětí střídače

Neoznačené vstupy vlevo ve schématu jsou návazností funkce F04 – Řízení IBG - slave. Jedná se o fázor požadovaného napětí, resp. jeho velikost a úhel. Tyto vstupy se uplatní není-li iniciován ostrovní provoz, který je v tomto schématu reprezentován signálem *isl_mod*, který je výstupem funkce F06 – Řízení IBG - master – obvod frekvence. V případě přechodu do ostrovního provozu je regulace velikosti napětí převzata funkcí F05 – Řízení IBG - master – obvod napětí skrze proměnnou *regU* a velikost úhlu fázoru napětí je zafixována na poslední hodnotě v čase přechodu. Při synchronním provozu je z dané linky určován signál *U_reg_mag*, který se uplatňuje v režimu sledování regulátoru funkce F05 – Řízení IBG - master – obvod napětí. Z dané linky signálů požadované velikosti a úhlu napětí je jednak vytvořen složkový tvar fázoru (prvek Polar/Rectangular Coordinate Converter), který se skrze signály *Ud_act* a *Uq_act* uplatní v rámci funkce F04 – Řízení IBG - slave, a jednak je generován harmonický průběh požadovaných hodnot napětí – *u1_req*, *u2_req* a *u3_req*, které se uplatní v *modulu samotného zdroje* – U nebo *modulu samotného zdroje* – IBG. Vznik harmonických signálů je generován prvky sinusových generátorů (prvek Trigonometric Functions) o požadované velikosti, fázi a frekvenci. Frekvence je v podstatě dána průběhem pilového signálu *PLL_theta_ABC*, který je tvořen funkcí fázového závěsu v *modulu měření* v případě synchronního provozu nebo signálem *PLL_theta_pevna* v případě ostrovního provozu. Signál *PLL_theta_pevna* tvořen prvkem signálového generátoru (prvek Signal Generator) jehož vnitřními proměnnými jsou signály *max_out_sig_gen*, určující maximální úroveň výstupu a *f_grid*, určující frekvenci signálu, přicházející z funkce F06 – Řízení IBG - master – obvod frekvence. Regulační schém

Do této funkce nevstupují žádná přímá uživatelská nastavení.

10.1.8 Řízení – IBG – S

Modul řízení je výpočetně nejnáročnější částí modelů. Jedná se o nejrozsáhlejší výpočetní algoritmus, který obsahuje i návaznosti – možnosti, které u určitých simulací nemusí být využity. Jedná se zejména o provoz VM v režimu master (*ctrlmode* = 2) a režimu resynchronizace (*ctrlmode* = 3). S tím souvisí i návaznosti přechodů mezi režimy, parametrizace regulátorů a režimy sledování regulátorů uplatňující se v módech *ctrlmode* = 0 a 1.

Modul řízení – IBG – S je tak oproti *modulu řízení – IBG – M/S* oproštěn o návaznosti, které nejsou využity v režimu slave. Rozdíl spočívá v odstranění funkcí F05 – Řízení IBG - master – obvod napětí a F06 – Řízení IBG - master – obvod frekvence včetně jejich návazností a uživatelských nastavení tak, jak jsou popsány v kapitole Řízení – IBG – M/S a v modifikaci funkcí F03 – Volič módů a F08 – Parametry RO – IBG tak, aby algoritmy řešily pouze návaznosti k provozu VM ve fázi fázování (*ctrlmode* = 0) a výkonovém PQ režimu (*ctrlmode* = 1). Logicky pak tento modul řízení není schopen pracovat v režimu vlastní spotřeby.

Vlastní popis modifikací algoritmů pro tento modul oproti *modulu řízení – IBG – M/S* není změrně v této práci uveden. Veškeré úpravy a výsledné schéma funkce jsou patrné schémat modулů přílohy této práce – knihovny *Library_SG.pslx*.

10.1.9 Řízení – SG – M/S

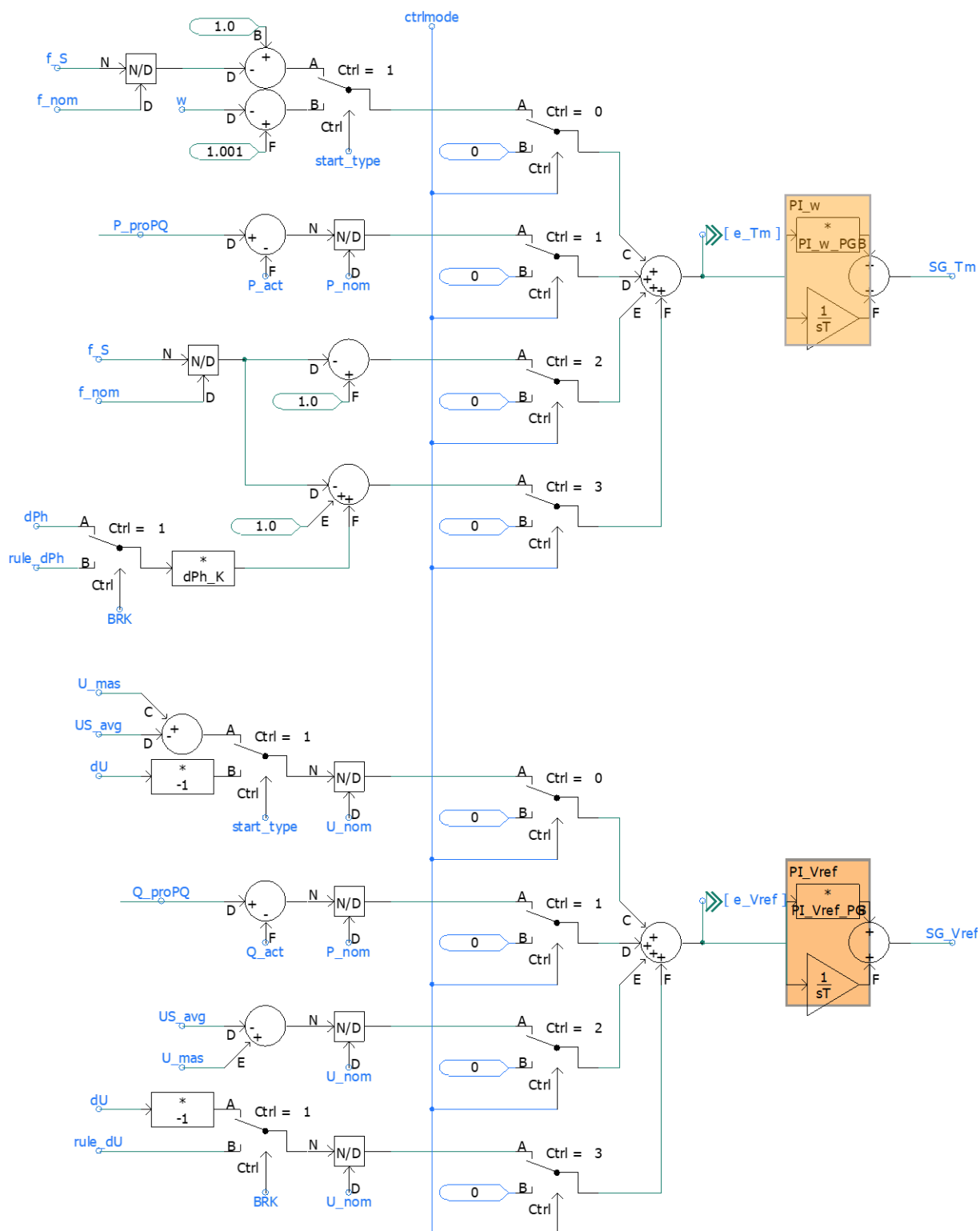
V modulu řízení SG je použita většina funkcí, které jsou implementovány i v *modulu řízení – IBG – M/S*. Jedná se o funkce:

- F01 – Nominální a požadovaný P,
- F11 – $P = f(f)$,
- F12 – $P = f(f^-)$,
- F13 – $P = f(f^+)$,
- F14 – $P = f(U)$,
- F15 – $Q = f(P)$,
- F16 – $Q = f(U)$,
- F02 – Výběr a rampa požadovaných P a Q a
- F03 – Volič módů.

Tyto funkce jsou popsány v rámci kapitoly 10.1.7 (od strany 176). Prakticky tak platí popis funkčních možností modulu řízení synchronního generátoru podobně jako u měničového zdroje.

F07 – Řízení SG

Základní schéma řízení, které je použito v *modulu řízení IBG* je zjednodušeně popsáno v rámci kapitoly Řízení SG (součást kapitoly 3.3.3, strana 95). Jde v podstatě o spolupráci dvou PI regulátorů, které jsou schopny regulovat potřebně parametry jak při PQ regulačním módu (*ctrlmode* = 1), tak při *U/f* regulačním módu (*ctrlmode* = 2). Samozřejmostí je implementace řídicích smyček pro fázování (*ctrlmode* = 0) a resynchronizaci (*ctrlmode* = 3). Regulační schéma je uvedeno na obr. 10-32 následované jeho popisem.



obr. 10-32: Schéma funkce F07 – Řízení SG

Výstupem regulačních obvodů jsou signály **SG_Tm**, který definuje požadovaný mechanický točivý moment SG a **SG_Vref**, který definuje napětíovou referenci pro svorky synchronního stroje. Požadované hodnoty těchto parametrů jsou určeny PI regulátory, jejichž parametry proporcionálních zesílení a časových konstant jsou dány proměnnými **PI_w_PG**, **PI_w_ITC**, **PI_Vref_PG** a **PI_Vref_ITC**, které jsou výstupem funkce F09 – Parametry RO – SG. Regulační odchylky vstupující do regulátorů jsou dány na základě hodnoty proměnné **ctrlmode**, která definuje regulační režim zdroje.

Pro fázovací proces je $ctrlmode = 0$ je vstupem regulátoru mechanického momentu buď odchylka měřené hodnoty frekvence na svorkách generátoru – f_S od nominální hodnoty frekvence – f_{nom} nebo rozdíl okamžitého mechanického momentu SG – w a hodnoty 1,001, díky které je dosaženo změny fáze výstupního harmonického průběhu napěťové vlny a tím umožněno přifázování zdroje k síti. To, který signál bude vstupem regulátoru určuje proměnná $start_type$, která je popsána v následujícím odstavci. Podobně je určena i hodnota vstupující na regulátor napětí. Na ten vstupuje buď rozdíl požadované hodnoty napětí sítě pro vlastní spotřebu nebo ostrov – U_{mas} a hodnoty napětí na svorkách generátoru – US_{avg} nebo rozdíl hodnot napětí před a za zdrojovým vypínačem – dU , který je určen *modulem synchronizace*. Obojí vztaženo k nominální hodnotě napětí zdroje – U_{nom} .

Proměnná $start_type$ je uživatelskou volbou modulu synchronizace (záložka Configuration, skupina 1. Connection, parametr Initialization type), která definuje typ iniciace zdroje. Existují zde 2 volby: „S2G“ (– Source to Grid) a „S2SC“ (– Source to Self Consumption). Při volbě „S2G“ bude zdroj (Source) přifázován do sítě (Grid) podle podmínek definovaných ve skupině Synchronization (v modulu synchronizace). Při volbě „S2SC“ bude zdroj (Source) rozběhnut do vlastní spotřeby (Self Consumption) – nedojde k sepnutí vypínače zdroje a zdroj bude pracovat v režimu master v ostrově tvořeném právě jen vlastní spotřebou.

Pro výkonový PQ režim – $ctrlmode = 1$ je vstupem regulátoru mechanického momentu, resp. regulátoru napětí signál P_{proPQ} , resp. Q_{proPQ} , které jsou výstupem funkce F02 – Výběr a rampa požadovaných P a Q, od kterého je odečtena hodnota aktuálního činného výkonu – P_{act} , resp. hodnota aktuálního jalového výkonu – Q_{act} a vztažena k nominálnímu výkonu zdroje – P_{nom} .

Pro režim U/f regulace – $ctrlmode = 2$ je vstupem regulátoru mechanického momentu odchylka podílu frekvence na svorkách generátoru – f_S a frekvence nominální – f_{nom} , stejně jako u provozu na vlastní spotřebu v režimu $ctrlmode = 0$. Podobně je i u regulátoru napětí, do kterého vstupuje rozdíl požadovaného (U_{mas}) a skutečného napětí (US_{avg}) vztažený k nominální hodnotě napětí zdroje (U_{nom}).

Pro režim resynchronizace – $ctrlmode = 3$ je vstupem regulátoru mechanického momentu poměr frekvence na výstupu generátoru (f_S) ku nominální frekvenci zdroje (f_{nom}), která je odečtena od hodnoty 1 a rozdílu fází napětí na obou stranách vypínače, který spojuje generátor se zbytkem sítě – dPh nebo $rule_dPh$. Za tento vypínač je brán zdrojový vypínač (BRK) v případě, že je v dané chvíli rozepnutý, nebo vypínač agenta, který je zvolen v návaznostech dálkové komunikace v případě, když je zdrojový vypínač sepnutý. Tento rozdíl fází je zesílen koeficientem dPh_K , který je uživatelskou volbou nastavení citlivosti odchylky fáze. Podobně, vstupem regulátoru napětí je hodnota odchylky napětí před a za zdrojovým vypínačem – dU v případě, že je zdrojový vypínač (BRK) v dané chvíli rozepnutý, nebo odchylka napětí na levé a pravé straně agenta spřaženého skrze dálkovou komunikaci – $rule_dU$ v případě, že je zdrojový vypínač v dané chvíli v sepnuté poloze. Obě tyto odchylky jsou vztaženy k nominální hodnotě napětí zdroje – U_{nom} .

Výstupní signály SG_Tm a SG_Vref jsou uplatněny v modulu samotného zdroje – SG.

Uživatelské nastavení s vazbou k této funkci je realizováno:

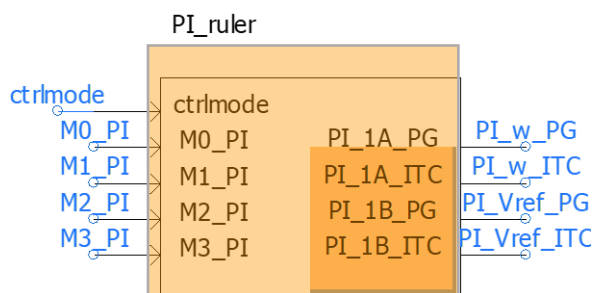
- v (1.) záložce *Configuration*,
 - skupině *Nominal parameters*,
 - parametr *Nominal power* – P_{nom} ,

- parametr *Nominal frequency (Hz)* – f_{nom} ,
- parametr *Nominal voltage (kV)* – U_{nom} ,
- skupině *Required parameters*,
 - parametr *Required master voltage* – U_{mas} ,
- v (3.) záložce *Master & Island setting*,
 - skupině *Resync setup*,
 - parametr *dPh gain* – dPh_K .

F09 – Parametry RO – SG

Funkce F09 určuje parametry proporcionálního zesílení a integrační časové konstanty pro oba PI regulátory, které jsou uplatněny v rámci *modulu řízení SG*. Výstupy funkce, která je dána definicí *DG_control_PI_SG*, se tak uplatňuje ve funkci F07 – Řízení SG. Pomocí této funkce je uživateli umožněno nastavit pro každý regulátor jeho parametry pro každý regulační mód.

Na obr. 10-33 je uvedeno schéma následované popisem schématu a popisem uživatelského nastavení.



obr. 10-33: Grafika a návaznosti funkce F09 – Parametry RO – SG

definice *DG_control_PI_SG*

Úkolem algoritmu definice je řazení nastavených hodnot požadovaných parametrů regulátorů v závislosti na regulačním módu. Vstupní signály jsou čtyřrozměrná pole s uživatelsky nastavenými hodnotami parametrů regulátorů a výstupy jsou signály proměnných všech uplatněných regulátorů.

Zdrojový kód definice *DG_control_PI_SG*:

```
#INCLUDE 's1.h'

IF ($ctrlmode == 0) THEN
    $PI_w_PG = $M0_PI(1)
    $PI_w_ITC = $M0_PI(2)
    $PI_Vref_PG = $M0_PI(3)
    $PI_Vref_ITC = $M0_PI(4)
ENDIF

IF ($ctrlmode == 1) THEN
    $PI_w_PG = $M1_PI(1)
    $PI_w_ITC = $M1_PI(2)
    $PI_Vref_PG = $M1_PI(3)
    $PI_Vref_ITC = $M1_PI(4)
ENDIF

IF ($ctrlmode == 2) THEN
    $PI_w_PG = $M2_PI(1)
    $PI_w_ITC = $M2_PI(2)
    $PI_Vref_PG = $M2_PI(3)
    $PI_Vref_ITC = $M2_PI(4)
ENDIF

IF ($ctrlmode == 3) THEN
    $PI_w_PG = $M3_PI(1)
    $PI_w_ITC = $M3_PI(2)
    $PI_Vref_PG = $M3_PI(3)
    $PI_Vref_ITC = $M3_PI(4)
ENDIF
```

Uživatelské nastavení je realizováno:

- v (4.) záložce *PI setup*, ve všech zdejších (4) skupinách a (16) parametrech.

10.1.10 Řízení – SG – S

Modul řízení je z důvodu své rozmanitosti výpočetně náročný. Jeho algoritmus pokrývá hned několik paralelních výpočtů, které se nemusí vždy všechny v dané simulaci využít. Jedná se zejména o provoz VM v režimu master (*ctrlmode* = 2) a režimu resynchronizace (*ctrlmode* = 3). S tím souvisí i návaznosti přechodů mezi režimy a parametrizace regulátorů uplatňujících se v módech *ctrlmode* = 0 a 1.

Modul řízení – SG – S je tak oproti *modulu řízení – SG – M/S* oproštěn o návaznosti, které nejsou využity v režimu slave. Rozdíl spočívá v odstranění návazností regulátorů pro režim master (*ctrlmode* = 2) a režim resynchronizace (*ctrlmode* = 3), včetně jejich návazností a uživatelských nastavení tak, jak jsou popsány v kapitole Řízení – SG – M/S a v modifikaci funkcí F03 – Volič módů a F09 – Parametry RO – SG tak, aby algoritmy řešily pouze návaznosti k provozu VM ve fázi fázování (*ctrlmode* = 0) a výkonovém PQ režimu (*ctrlmode* = 1). V modulu je zachována možnost provozu SG v režimu vlastní spotřeby.

Vlastní popis modifikací algoritmů pro tento modul oproti *modulu řízení – SG – M/S* není změrně v této práci uveden. Veškeré úpravy a výsledné schéma funkce jsou patrné schémat modulu přílohy této práce – knihovny *Library_SG.pslx*.

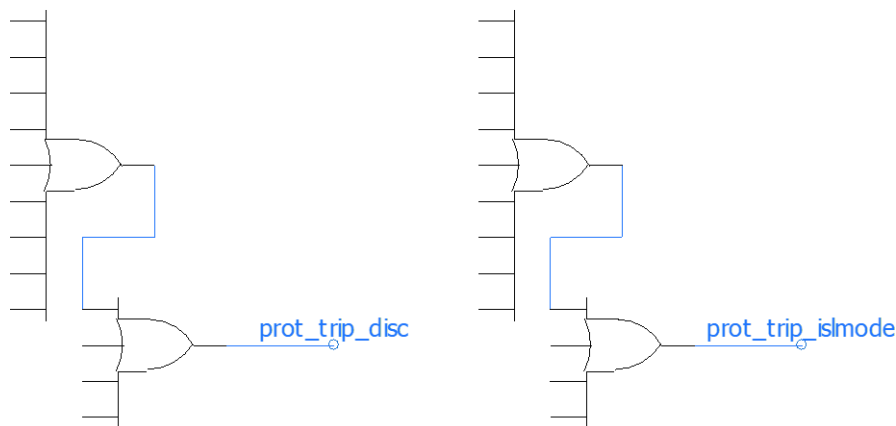
10.1.11 Ochrany

Funkce ochranných systémů je oproti systémům řídicích podstatně jednodušší. Výstupy ochranné funkce jsou většinou binární, kdy úkolem je sledování určeného parametru a hlídání překročení ochranných limit. Složitost nastává v míře možného nastavení charakteristik a funkcí ochran. U ochran modelu VM jsou vyhodnocovanými parametry velikosti napětí, jeho frekvence a míra změny frekvence. Realizace hlídání mezi napětí a frekvence včetně časového zpoždění se dá realizovat jednoduše, pomocí komparátoru a funkce časového zpoždění. Požadavkem však je jednak schopnost aktivace funkce při konkrétním stavu sítě (viděno od chráněného zdroje – synchronní provoz vs. ostrovní provoz), při konkrétním regulačním módu VM (master vs. slave), a jednak s možností volby aktivace konkrétního výstupního signálu (odpojení vs. signalizace, resp. požadavek na přechod do ostrovního provozu). Společné pro všechny ochranné funkce je také možnost nastavení časové prodlevy aktivace výstupu a časové prodlevy inicializace ochranné funkce jako takové – z důvodu možnosti vyblokování modulu ochrany při inicializaci, připojování a najíždění VM (které může v rámci simulací vyvolat takové stavy, které by vedly k zapůsobení dílčí ochranné funkce). Díky společným požadavkům na všechny použité ochranné funkce lze vytvořit algoritmus, který bude společný pro všechny ochranné funkce. Tento algoritmus je realizován v rámci definice *DG_prot_stage*, která je popsána v popisu funkce O01 – ANSI 27.

F22 – Výstup modulu ochran

Výstupy každého použitého stupně níže popsaných ochranných funkcí (2 × O01 – ANSI 27 (podpěťové relé), 4 × O02 – ANSI 59 (nadpěťové relé), 2 × O03 – ANSI 81U (podfrekvenční relé), 2 × O04 – ANSI 81O (nadfrekvenční relé) a 2 × O05 – ANSI 81R (RoCoF) – celkem 12) jsou přivedeny na hradla logického součtu, jejichž výstupem je signál *prot_trip_disc*, který se uplatňuje v modulu synchronizace, kde ve svém důsledku inicializuje popud na odpojení vypínače v místě připojení VM k síti, a signál *prot_trip_islmode*, který se uplatňuje v modulu řízení, kde ve svém důsledku inicializuje popud k přechodu do regulačního módu nastaveného pro ostrovní provoz. S oběma výstupními signály lze dále pracovat v rámci modulu komunikace, odkud je lze vynést z modelu VM k dalším účelům, např. poskytnout logice MAS, chytré sítě apod.

Schéma funkce, která jednoduše vyhodnocuje zapůsobení kteréhokoliv nastavitelného stupně ochranných funkcí je zobrazena na obr. 10-34. (Kombinace dvou hradel (prvky Logic Gate) byla použita z důvodu omezení počtu vstupů daného prvku (maximum je 9 vstupů).)

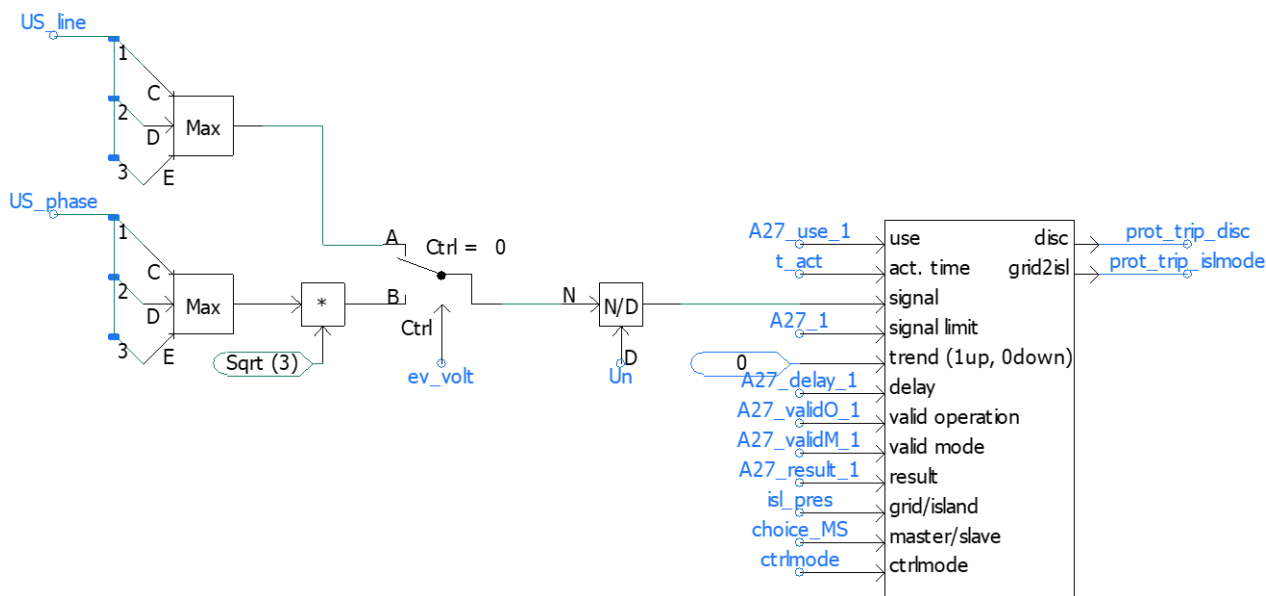


obr. 10-34: Schéma funkce F22

O01 – ANSI 27

Funkce podpěťové ochrany je aplikována na základě požadavků uvedených v rámci kapitoly 3.4.

Na obr. 10-35 je uvedeno schéma následované popisem schématu a popisem uživatelského nastavení pro jeden stupeň dané ochrany. V rámci modulu ochran je pro tento typ ochrany umožněno použít dvou stupňů²² ochran. Uvedený popis je vztažen k jednomu ze stupňů, což je pro signály specifické pro nastavení daného stupně odlišeno indexem *_I*.



obr. 10-35: Schéma funkce O01 – ANSI 27

²² Nejedná se o stupeň v normách definovaných slovesu smyslu, ale jedná se o možnost odlišného nastavení daného typu ochrany pro jiné podmínky provozu soustavy (synchronní a ostrovní provoz) v kombinaci s módem VM (master a slave) a požadovaným výstupním popudem (odpojení a přechod do ostrova). (Viz kapitolu 9.1.3 pro podrobnější popis zvoleného řešení.)

Povolení použití všech stupňů podpětové ochrany je inicializováno volbou **A27**, která při volbě „yes“ povoluje nastavení příslušných parametrů v záložce **ANSI 27 - UnderVoltage** modulu ochrany. Proměnná **A27** se vyskytuje pouze v podmíněném výrazu této záložky.

Funkce je z velké části řešená definicí **DG_prot_stage**. Vstupní signál s označením **signal**, který je nutné přivést na vstup definice je vytvořen na základě volby **ev_volt**, která je uživatelskou volbou typu napětí použitého pro funkci ochrany. Při volbě „**line (L-L)**“ je pracováno s nejvyšší sdruženou hodnotou napětí v místě připojení zdroje. Signál je získán z modulu měření skrze signál **US_line** a funkci výběru maxima (prvek Maximum/Minimum Function). Při volbě „**phase (L-G)**“ je pracováno s nejvyšší fázovou hodnotou napětí v místě připojení zdroje. Signál je v tomto případě získán z modulu měření skrze signál **US_phase**, funkci výběru maxima (prvek Maximum/Minimum Function) a přepočtem na sdruženou hodnotu napětí. Před vstupem do definice je totiž signál podělen jmenovitou hodnotou napětí (sdružená hodnota) – **Un**, aby bylo docíleno práce definice v poměrných jednotkách. Volba typu napětí, které bude vstupovat do stupňů podpětových ochran závisí na typu sítě, do které je VM připojen. Sdružené (line) napětí je vhodné použít, pokud je příslušná strana navazujícího transformátoru zapojena do trojúhelníku. Fázové (phase) napětí je vhodné použít v případě, kdy je použit střední vodič nebo je příslušná strana navazujícího transformátoru zapojena do hvězdy.

definice DG_prot_stage

Výstupem definice **DG_prot_stage** jsou signály **prot_trip_disc** (výstup s označením **disc**) a **prot_trip_islmode** (výstup s označením **grid2isl**). První vede v navazujících systémech k povelu na vypnutí vypínačů VM, druhý se uplatňuje v modulu řízení a vede k přechodu funkce VM do ostrovního režimu.

Práce algoritmu, který se skrývá v definici, je inicializována jednak v případě volby „yes“ signálu **A27_use_1**, který je uživatelskou volbou povolení uplatnění daného stupně ochrany (volba „no“ blokuje funkci daného stupně ochrany), a jednak až po uplynutí času **t_act**, který je společný pro všechny funkce v rámci modulu ochran. Dalším vstupem je samotný porovnávaný signál, v případě podpětové ochrany signál zvoleného typu napětí vztažený k nominální hodnotě napětí zdroje. Tento vstupní signál je v algoritmu definice porovnáván se signálem **A27_1**, který je uživatelem nastaven jako prahová hodnota, jejíž překročení vede ke změně hodnoty výstupu definice. To, jestli je hlídáno překročení nebo podkročení prahové hodnoty je definováno binární hodnotou na vstupu s označením **trend (1up, 0down)**. Signál s hodnotou jedna na tomto vstupu vede k tomu, že k popudu pro změnu hodnoty výstupu definice vede stav, kdy hodnota signálu na vstupu **signal** je větší než hodnota signálu na vstupu **signal limit**. Logicky, obráceně to platí při hodnotě nula na vstupu **trend (1up, 0down)**. Pro funkci podpětového relé je zřejmé, že hodnota tohoto vstupu bude právě nula. Po podkročení prahové hodnoty se uplatňuje část algoritmu, kde hraje roli nastavená hodnota signálu **A27_delay_1**, která je funkcí časového zpoždění změny výstupu definice. Prahová hodnota musí být podkročena po celou dobu časového zpoždění.

Následující dvojice vstupních signálů se vážou k platnosti funkce ochrany. Pomocí signálu **A27_validO_1** je volena platnost stupně ochrany pro různé stavy sítě. Volbou „**grid only**“ je nastavena platnost ochrany pouze pro synchronní provoz VM se sítí, volba „**island only**“ nastavuje platnost ochrany pouze v rámci ostrovního provozu VM a volba „**always**“ nastavuje platnost ochrany v obou provozních stavech. Pomocí signálu **A27_validM_1** je volena platnost stupně ochrany pro různé provozní módy VM. Volbou „**master only**“ je nastavena platnost ochrany pouze pro režim master, volba „**slave only**“ nastavuje platnost ochrany pouze v režimu slave a volba

„*always*“ nastavuje platnost ochrany v obou provozních režimech. Takto vzniká možnost uživatelského nastavení stupně ochrany pro různé provozní stavy sítě a režimy VM.

Pro zjištění provozního stavu sítě a režimu/módu regulace VM je využita kombinace signálů *isl_pres*, který podává informaci o provozním režimu, ve kterém se VM nalézá (synchronní vs. ostrovní provoz), *choice_MS*, který podává informaci o nastavení řízení VM (master vs. slave) v rámci provozního režimu (synchronní vs. ostrovní provoz) a *ctrlmode*, který podává informaci o aktuálním řídicím módu VM.

Posledním vstupem do definice je signál *A27_result_1*, který je uživatelskou volbou požadovaného typu výstupu. V případě volby „*disconnection*“ je při podkročení prahové hodnoty vyhodnocovaným signálem a případným zpožděním aktivován výstup s označením *disc*, který v dalších návaznostech vede k odpojení VM od sítě. V případě volby „*grid to island*“ je při podkročení prahové hodnoty a případným zpožděním aktivován výstup s označením *grid2isl*, který v dalších návaznostech vede k vyvolání přechodu do ostrovního provozu ve struktuře řízení VM. Aktivace je provedena změnou hodnoty příslušného výstupu z hodnoty logické nuly na jedničku.

Definice neobsahuje možnost uplatnění resetu. To není standartním provedením ochranné funkce, nicméně toto řešení bylo zvoleno s ohledem na proces, který řeší další návaznosti výstupních signálů. V obou případech je aktivován prahový obvod, který vede k aktivaci určité návaznosti i v případě, kdy se sledovaný parametr navrátí zpět nad prahovou hodnotu. Z toho důvodu není třeba řešit resetování přímo v rámci funkce ochrany.

Zdrojový kód definice *DG_prot_stage*:

```
#INCLUDE 'sl.h'
#include 'emtstor.h'
#LOCAL REAL buff
#LOCAL INTEGER trig

buff = STORF(NSTORF)
trig = STORI(NSTORI)

IF (time == delt) THEN
    buff = 0
    trig = 0
    stav = 0
ENDIF

$disc = 0
$g2i = 0

IF ($use == 1 .AND. time >= t_act) THEN

    IF (($trend == 1 .AND. $sig >= $siglim) .OR.
        ($trend == 0 .AND. $sig <= $siglim)) THEN
        buff = buff + delt
    ENDIF

    IF (($trend == 1 .AND. $sig < $siglim) .OR.
        ($trend == 0 .AND. $sig > $siglim)) THEN
        buff = 0
        trig = 0
    ENDIF

    IF (buff > $delay) THEN
        trig = 1
    ENDIF

    IF (trig == 1) THEN
        IF (($GI == 0) .AND. ($MS .NE. 2) .AND.
            ($VO .NE. 1) .AND. ($VM .NE. 0)) THEN
            IF ($R == 0) THEN
                $disc = 1
            ELSE
                $g2i = 1
            ENDIF
        ENDIF
    ENDIF
ENDIF
```

```
IF (($GI == 0) .AND. ($MS == 2) .AND. ($VO
.NE. 1) .AND. ($VM .NE. 1)) THEN
    IF ($R == 0) THEN
        $disc = 1
    ELSE
        $g2i = 1
    ENDIF
ENDIF

IF (($GI == 1) .AND. ($CM <= 1) .AND. ($VO
.NE. 0) .AND. ($VM .NE. 0)) THEN
    IF ($R == 0) THEN
        $disc = 1
    ELSE
        $g2i = 1
    ENDIF
ENDIF

IF (($GI == 1) .AND. ($CM >= 2) .AND. ($VO
.NE. 0) .AND. ($VM .NE. 1)) THEN
    IF ($R == 0) THEN
        $disc = 1
    ELSE
        $g2i = 1
    ENDIF
ENDIF

ENDIF

ENDIF

STORF(NSTORF) = buff
STORI(NSTORI) = trig

NSTORF = NSTORF + 1
NSTORI = NSTORI + 1
```

ENDIF

|

Uživatelské nastavení je realizováno v modulu ochran:

- v (1.) záložce *Configuration*,
 - skupině *General*,
 - parametr *Activation time* – *t_act*,
 - parametr *Evaluated voltage* – *ev_volt*,
 - parametr *Allow ANSI 27 - UnderVoltage* – *A27*,
- v (2.) záložce *ANSI 27 - UnderVoltage*,
 - skupině *Stage 1*,
 - parametr *Use stage?* – *A27_use_1*,
 - parametr *U- stage 1* – *A27_1*,
 - parametr *U- stage 1 delay* – *A27_delay_1*,
 - parametr *Valid for (operation)* – *A27_validO_1*,
 - parametr *Valid for (mode)* – *A27_validM_1*,
 - parametr *Leads to* – *A27_result_1*.

Stejně možnosti nastavení v rámci záložky *ANSI 27 - UnderVoltage* jsou realizované i pro stupeň číslo 2 (značeny indexem *_2*) nastavitelný ve skupině *Stage 2*.

O02 – ANSI 59

Funkce nadpět'ové ochrany je aplikována na základě požadavků uvedených v rámci kapitoly 3.4.

Schéma této funkce je v podstatě obdobou schématu funkce O01 – ANSI 27 uvedeného na obr. 10-35. Odlišnosti oproti funkci podpět'ových relé jsou:

- ve značení signálů vstupujících do definice *DG_prot_stage* (místo předpony *A27* je použita předpona *A59*),
- v přivedení signálu logické 1 na vstup *trend (1up, 0down)* definice (čímž je dosaženo hlídání překročení (ne podkročení) prahové hodnoty vyhodnocovaného signálu),
- v uživatelském nastavení, které je realizované v záložce *ANSI 59 - OverVoltage* a
- v počtu stupňů, které jsou celkem 4.

Povolení použití všech stupňů nadpět'ové ochrany je inicializováno volbou *A59*, která při volbě „yes“ povoluje nastavení příslušných parametrů v záložce *ANSI 59 - OverVoltage* modulu ochrany. Proměnná *A59* se vyskytuje pouze v podmíněném výrazu této záložky.

Uživatelské nastavení je realizováno v modulu ochran:

- v (1.) záložce *Configuration*,
 - skupině *General*,
 - parametr *Activation time* – *t_act*,
 - parametr *Evaluated voltage* – *ev_volt*,
 - parametr *Allow ANSI 59 - OverVoltage* – *A59*,
- v (3.) záložce *ANSI 59 - OverVoltage*,
 - skupině *Stage 1*,
 - parametr *Use stage?* – *A59_use_1*,
 - parametr *U+ stage 1* – *A59_1*,
 - parametr *U+ stage 1 delay* – *A59_delay_1*,

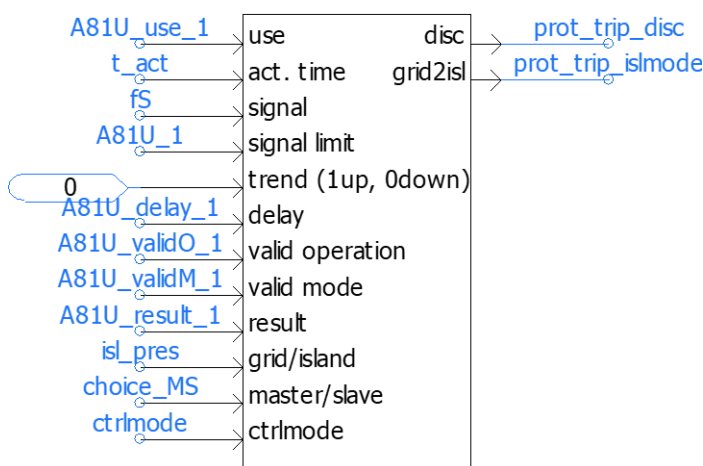
- parametr *Valid for (operation)* – [A59_validO_1](#),
- parametr *Valid for (mode)* – [A59_validM_1](#),
- parametr *Leads to* – [A59_result_1](#).

Stejně možnosti nastavení v rámci záložky *ANSI 59 - OverVoltage* jsou realizované i pro stupně číslo 2, 3 a 4 (značeny indexy *_2*, *_3* a *_4*) nastavitelné ve skupině *Stage 2*, *Stage 3* a *Stage 4*.

O03 – ANSI 81U

Funkce podfrekvenční ochrany je aplikována na základě požadavků uvedených v rámci kapitoly 3.4.

V principu vyhodnocení je tato funkce obdobou funkce O01 – ANSI 27 s tím rozdílem, že vyhodnocován je signál frekvence – *fS* a ne napětí. Je použita skutečná hodnota frekvence v jednotkách Hz. Proto i nastavená prahová hodnota musí být zadávána ve stejných jednotkách. Na obr. 10-36 je uvedeno schéma dané funkce. Použita je opět definice *DG_prot_stage*, která je popsána v rámci funkce O01 – ANSI 27. V rámci modulu ochran je pro tento typ ochrany umožněno použít dvou stupňů ochrany.



obr. 10-36: Schéma funkce O03 – ANSI 81U

Povolení použití všech stupňů podfrekvenční ochrany je inicializováno volbou [A81U](#), která při volbě „yes“ povoluje nastavení příslušných parametrů v záložce *ANSI 81U - UnderFrequency* modulu ochrany. Proměnná *A81U* se vyskytuje pouze v podmíněném výrazu této záložky.

Odlišnosti oproti popisu návaznosti k definici *DG_prot_stage* tak jak je popsána v kapitole O01 – ANSI 27 je ve značení šesti interních proměnných na vstupu do definice, kdy je místo předpony *A27* použita předpona *A81U*.

Uživatelské nastavení je realizováno v modulu ochran:

- v (1.) záložce *Configuration*,
 - skupině *General*,
 - parametr *Activation time* – *t_act*,
 - parametr *Allow ANSI 81U - UnderFrequency* – [A81U](#),
- ve (4.) záložce *ANSI 81U - UnderFrequency*,
 - skupině *Stage 1*,
 - parametr *Use stage?* – [A81U_use_1](#),
 - parametr *f- stage 1* – [A81U_1](#),

- parametr *f- stage 1 delay* – *A81U_delay_1*,
- parametr *Valid for (operation)* – *A81U_validO_1*,
- parametr *Valid for (mode)* – *A81U_validM_1*,
- parametr *Leads to* – *A81U_result_1*.

Stejně možnosti nastavení v rámci záložky *ANSI 81U - UnderFrequency* je realizované i pro stupeň číslo 2 (značen indexem *_2*) nastavitelné ve skupině *Stage 2*.

O04 – ANSI 81O

Funkce nadfrekvenční ochrany je aplikována na základě požadavků uvedených v rámci kapitoly 3.4.

Schéma této funkce je v podstatě obdobou schématu funkce O03 – ANSI 81U uvedeného na obr. 10-36. Odlišnosti oproti funkci nadfrekvenčních relé jsou:

- ve značení signálů vstupujících do definice *DG_prot_stage* (místo předpony *A81U* je použita předpona *A81O*),
- v přivedení signálu logické 1 na vstup *trend (1up, 0down)* definice (čímž je dosaženo hlídání překročení (ne podkročení) prahové hodnoty vyhodnocovaného signálu) a
- v uživatelském nastavení, které je realizované v záložce *ANSI 81O - OverFrequency*.

Povolení použití všech stupňů nadfrekvenční ochrany je inicializováno volbou *A81O*, která při volbě „yes“ povoluje nastavení příslušných parametrů v záložce *ANSI 81O - Overfrequency* modulu ochrany. Proměnná *A81O* se vyskytuje pouze v podmíněném výrazu této záložky.

Uživatelské nastavení je realizováno v modulu ochran:

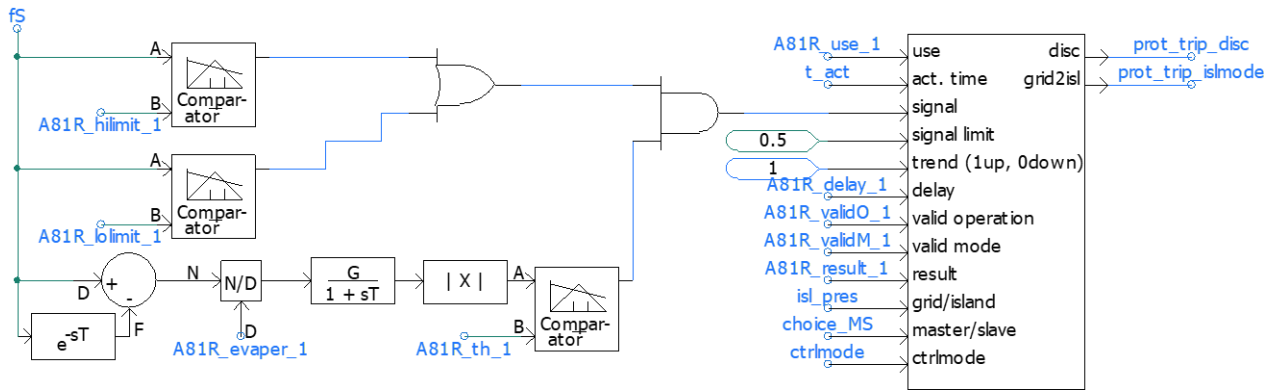
- v (1.) záložce *Configuration*,
 - skupině *General*,
 - parametr *Activation time* – *t_act*,
 - parametr *Allow ANSI 81O - UnderFrequency* – *A81O*,
- v (5.) záložce *ANSI 81O - UnderFrequency*,
 - skupině *Stage 1*,
 - parametr *Use stage?* – *A81O_use_1*,
 - parametr *f+ stage 1* – *A81O_1*,
 - parametr *f+ stage 1 delay* – *A81O_delay_1*,
 - parametr *Valid for (operation)* – *A81O_validO_1*,
 - parametr *Valid for (mode)* – *A81O_validM_1*,
 - parametr *Leads to* – *A81O_result_1*.

Stejně možnosti nastavení v rámci záložky *ANSI 81O - UnderFrequency* je realizované i pro stupeň číslo 2 (značen indexem *_2*) nastavitelné ve skupině *Stage 2*.

O05 – ANSI 81R

Funkce ochrany typu RoCoF je aplikována na základě požadavků uvedených v rámci kapitoly 3.4. Při sestavování algoritmu funkce RoCoF tak, jak je popsána v této kapitole, se vycházelo z blokového schématu uvedeného na obr. 2-6 (strana 40).

Na obr. 10-37 je uvedeno schéma následované popisem schématu a popisem uživatelského nastavení pro jeden stupeň dané funkce. V rámci modulu ochran je pro tento typ ochrany umožněno použít dvou stupňů. Uvedený popis je vztažen ke stupni číslo 1 (přípona názvu signálu *_1*).



obr. 10-37: Schéma funkce O05 – ANSI 81R

Povolení použití všech stupňů funkce RoCoF je inicializováno volbou **A81R**, která při volbě „yes“ povoluje nastavení příslušných parametrů v záložce **ANSI 81R - UnderVoltage** modulu ochrany. Proměnná **A81R** se vyskytuje pouze v podmíněném výrazu této záložky.

Výstupem funkce jsou signály **prot_trip_disc** (výstup definice s označením *disc*) a **prot_trip_islmode** (výstup definice s označením *grid2isl*). První vede v navazujících systémech k povelu na vypnutí vypínačů VM, druhý se uplatňuje v modulu řízení a vede k přechodu funkce VM do ostrovního režimu.

Pro funkci je použita definice **DG_prot_stage**, která je podrobně popsána v kapitole O01 – ANSI 27. Vstupní signál (vstup *signal*) je dán výstupem logického součinu (prvek Logic Gate), na jehož vstupy jsou přivedeny signály podmiňující k zapůsobení ochrany. První větev, jejíž výstup je přiveden na funkci logického součinu ověřuje platnost funkce pro nastavené odchylky frekvence. V komparátorech (prvky Two Input Comparator) jsou porovnávány aktuální hodnota frekvence – **fS** a uživatelem nastavená hodnota pro povolení výstupu funkce RoCoF, a to horní limit reprezentovaný signálem **A81R_hilimit_1** a dolní limit reprezentovaný signálem **A81R_lolimit_1**. Při překročení, resp. podkročení hodnot reprezentované signálem **A81R_hilimit_1**, resp. **A81R_lolimit_1** je výstupem komparátoru hodnota logické 1, která vstupuje na prvek logického součinu (prvek Logic Gate), jehož výstup tak vlastně povoluje uplatnění výstupu druhé větve prvku logického součinu. Tato druhá větev je realizací samotné funkce RoCoF. Na vstupu této větve je od hodnoty aktuální frekvence **fS** odečítána její hodnota zpožděná o uživatelen nastavenou hodnotu **A81R_evaper_1**, která reprezentuje časové okno pro výpočet rychlosti změny frekvence. Obvykle je volena hodnota 2 až 40 period, což odpovídá času 0,04 až 0,80 sekund, a která je vnitřní proměnnou prvku časového zpoždění (prvek Delay). Touto hodnotou (která reprezentuje časový usek dt ve funkci derivace frekvence df/dt) je dělena hodnota rozdílu frekvence, čímž je proveden požadovaný výpočet rychlosti změny frekvence. Navazující filtr (prvek Real Pole) pak s nastavenými konstantami zesílení **A81R_Fgain_1** a časové konstanty **A81R_Ftimecons_1** upravuje výstupní signál, jehož absolutní hodnota (prvek Absolute Value) vstupuje na komparátor (prvek Two Input Comparator), kde je porovnávána s nastavenou prahovou hodnotou rychlosti změny frekvence (β) reprezentované signálem **A81R_th_1**. Při překročení prahové hodnoty rychlosti změny frekvence je výstupem komparátoru signál logické 1. Z tohoto popisu je zřejmé, že signál logické jedna na vstupu *signal* definice znamená popud funkce RoCoF. Právě proto je prahová hodnota pro vyhodnocení překročení hodnoty vstupního signálu v definici – hodnota na vstupu *signal limit* zvolena 0,5 a hodnota na vstupu *trend (1up, 0down)* zvolena 1.

Uživatelské nastavení je realizováno v modulu ochran:

- v (1.) záložce *Configuration*,

- skupině *General*,
 - parametr *Activation time* – *t_act*,
 - parametr *Allow ANSI 81R - RoCoF* – *A81R*,
- v (6.) záložce *ANSI 81R - RoCoF*,
 - skupině *Stage 1*,
 - parametr *Use stage?* – *A81R_use_1*,
 - parametr *Evaluation period* – *A81R_evaper_1*,
 - parametr *Threshold value (beta)* – *A81R_th_1*,
 - parametr *Stage 1 delay* – *A81R_delay_1*,
 - parametr *f- limit* – *A81R_lolimit_1*,
 - parametr *f+ limit* – *A81R_hilimit_1*,
 - parametr *Filter gain* – *A81R_Fgain_1*,
 - parametr *Filter time constant* – *A81R_Ftimecons_1*,
 - parametr *Valid for (operation)* – *A81R_validO_1*,
 - parametr *Valid for (mode)* – *A81R_validM_1*,
 - parametr *Leads to* – *A81R_result_1*.

Stejně možnosti nastavení v rámci záložky *ANSI 81R - RoCoF* je realizované i pro stupeň číslo 2 (značen indexem *_2*) nastavitelné ve skupině *Stage 2*.

10.1.12 Synchronizace

Modul synchronizace zajišťuje připojení VM k síti, повеlem na sepnutí vývodového vypínače zdroje. V rámci modulu jsou využity funkce hlídající splnění fázovacích podmínek a synchronizační logiky. Nastavitelnými parametry modulu pak jsou právě parametry související s těmito funkcemi.

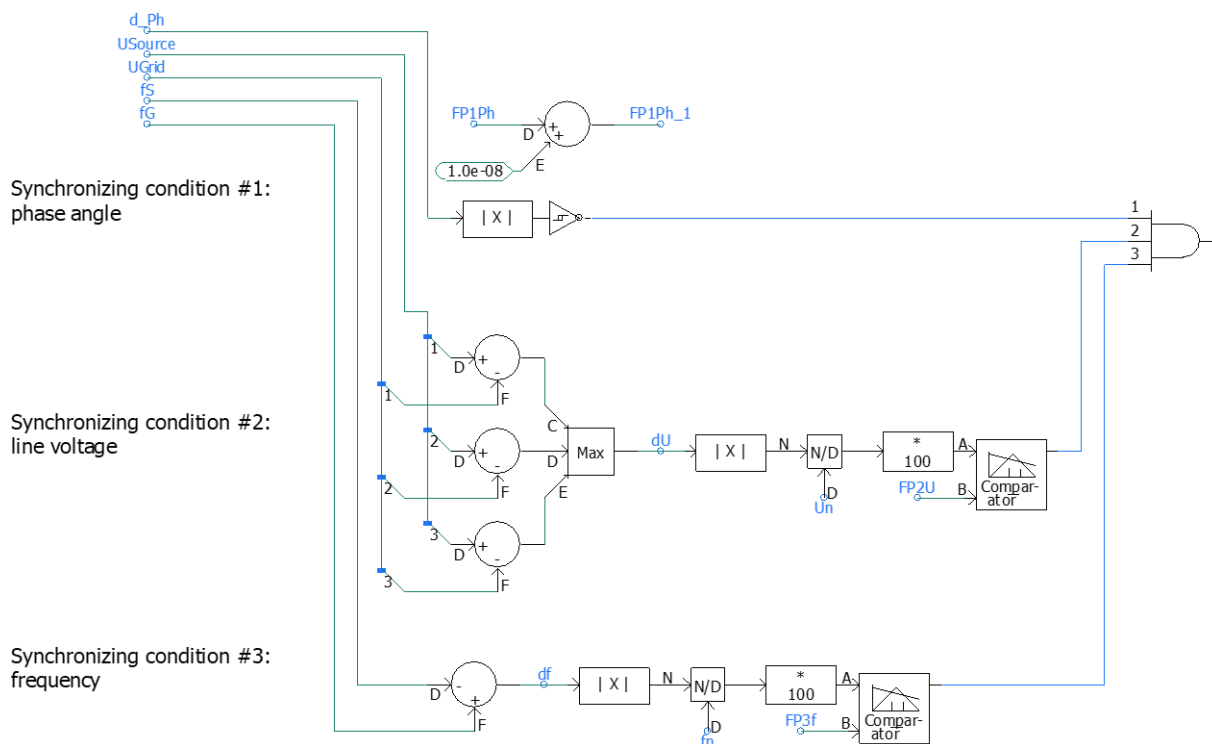
V parametrech nastavení zdroje není zakomponována schopnost inicializace zdroje v uživatelem zvoleném čase. Důvodem je princip práce s prvkem synchronního generátoru v programu PSCAD. Funkce, která by zajišťovala najetí SG tak, jak se tomu děje v reálu, by byla zbytečně složitá a celý proces by zabral dlouhý čas. Navíc, stavy inicializace VM nejsou předmětem žádného bodu této práce.

F19 – Fázovací podmínky

Tato funkce sleduje splnění fázovacích podmínek. V rámci simulačního prostředí má smysl sledovat pouze následující tři fázovací podmínky:

- 1) Fázový posun mezi okamžitými hodnotami na straně zdroje a sítě.
- 2) Velikost efektivních hodnot sdružených napětí na straně zdroje a sítě.
- 3) Velikost frekvence na straně zdroje a sítě.

Schéma algoritmu funkce F19 je uveden na obr. 10-38.



obr. 10-38: Schéma funkce F19 – Fázovací podmínky

První fázovací podmínka – fázové úhly napětí, jsou řešeny na základě parametru d_Ph z modulu měření, jehož absolutní hodnota vstupuje na prvek hystereze, který je pro tento případ vhodné použít. Funkce hystereze poskytuje určitou odolnost proti šumu tím, že brání přechodu do nového logického stavu, dokud se vstupní signál nepřesáhne oblast hystereze danou rozdílem hodnot $FP1Ph$ a $FP1Ph_1$. Výstupem funkce hystereze je logická hodnota, v tomto případě logická 1 v případě, když je vstupní signál nižší než uživatelem nastavená hodnota $FP1Ph$ – maximální fázový posun mezi okamžitými hodnotami napětí zdroje a sítě zadaný ve stupních.

Druhá fázovací podmínka – velikost napětí, je řešena algoritmem, který v první fázi vybere největší rozdíl fázových napětí $USource$ a $UGrid$ shodných fází. Takto vzniklý signál dU je výstupním signálem modulu synchronizace uplatňující se modulu řízení při procesu připojování VM z provozu na vlastní spotřebu do synchronního provozu se zbytkem sítě. Z absolutní hodnoty daného signálu je pak získána procentní hodnota poměrného napětí vůči nominální hodnotě napětí VM – Un přepočtené na fázovou hodnotu, která je dále v komparátoru porovnána s uživatelem zadanou maximální hodnotou rozdílu efektivních hodnot napětí zdroje a sítě pro splnění fázovací podmínky, udanou v procentech jmenovitého napětí VM – $FP2U$. Výstupem komparátoru je logická 1 v případě poklesu rozdílu velikostí fází pod nastavenou mez.

Třetí fázovací podmínka – velikost frekvence, je řešena algoritmem, který v první fázi určí rozdíl velikostí frekvence na straně zdroje a straně sítě. Takto vzniklý signál df je výstupním signálem modulu synchronizace uplatňující se modulu řízení při procesu připojování VM z provozu na vlastní spotřebu do synchronního provozu se zbytkem sítě. Z absolutní hodnoty daného signálu je pak získána procentní hodnota poměrné frekvence vůči nominální hodnotě frekvence VM – fn , která je dále v komparátoru porovnána s uživatelem zadanou maximální hodnotou rozdílu frekvence napětí zdroje a sítě pro splnění fázovací podmínky, udanou v procentech jmenovité frekvence VM – $FP3f$. Výstupem komparátoru je logická 1 v případě poklesu rozdílu velikosti frekvence pod nastavenou mez.

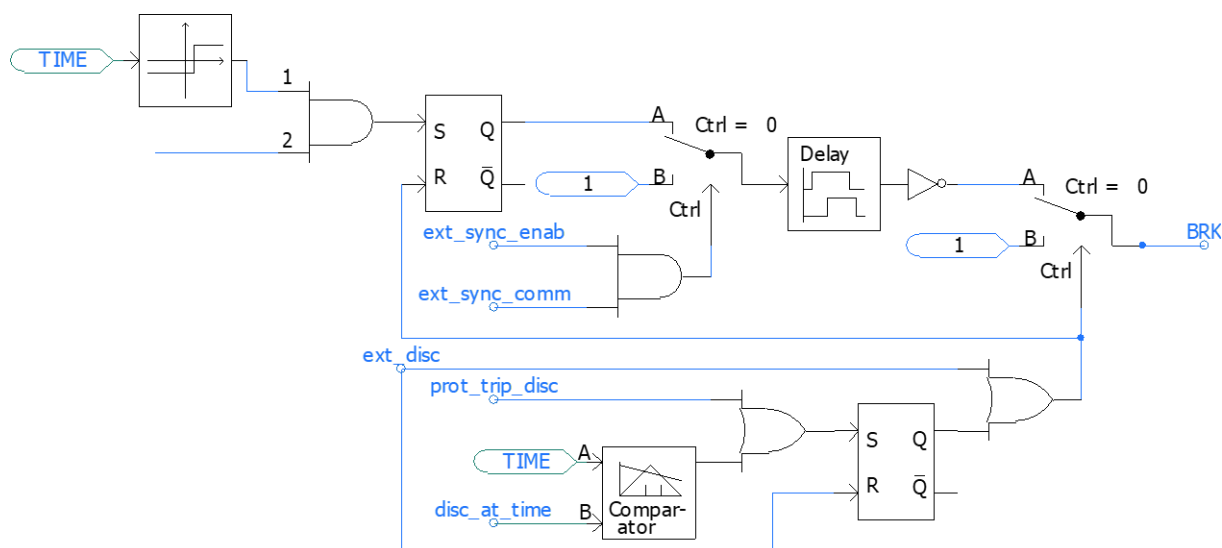
Výstupní signály všech tří algoritmů fázovacích podmínek jsou přivedeny na vstup hradla logického součinu, jehož výstup je navazuje do funkce F20.

Uživatelské nastavení je realizováno v modulu synchronizace:

- v (1.) záložce *Configuration*,
 - skupině 2. *Synchronization*,
 - parametr *Sync. condition 1 - phase (deg)* – *FP1Ph*,
 - parametr *Sync. condition 2 - Urms (%)* – *FP2U*,
 - parametr *Sync. condition 3 - f (%)* – *FP3f*.

F20 – Synchronizační logika

Synchronizační logika modelu VM má za úkol po splnění fázovacích podmínek inicializovat povel pro sepnutí vývodového vypínače VM. Navíc jsou v této úrovni, resp. funkci aplikovány některé další návaznosti popsané dále v textu této kapitoly. Schéma funkce je uvedeno na obr. 10-39.



obr. 10-39: Schéma funkce F20 – Synchronizační logika

Na úvodní hradlo logického součinu je na vstup 1 přiveden signál funkce komparátoru, jehož výstupním signálem se stane logická 1 po překročení uživatelem nastaveného času skrze proměnnou *sync_allow*, reprezentující časovou prodlevu od počátku simulace pro povolení přifázování zdroje k síti. Na vstup 2 hradla je přiveden výstup funkce F19. Následná logika aktivuje povel sepnutí vypínače VM skrze signál *BRK*, který je povel na vypínač v modulu samotného zdroje. V cestě spínacího povelu se ještě uplatní funkce časového zpoždění přenosu povelu, který lze uživatelsky definovat skrze proměnnou *sync_delay*. Povel na sepnutí vypínače lze také realizovat prostřednictvím signálu *ext_sync_enab*, který je uživatelskou volbou povolení možnosti ovládaní přifázování zdroje k síti pomocí povelu reprezentovaného signálem *ext_sync_comm*.

Povel na rozepnutí vypínače VM lze řešit uživatelskou volbou konkrétního času simulace pro odpojení – skrze proměnnou *disc_at_time* nebo proměnnou reprezentovanou signálem *ext_disc*, který je uživatelem definovatelný. Třetí možností pro povel na odpojení VM od sítě je povel z modulu ochrany – *prot_trip_disc*. Signál *ext_dis* je zároveň využit pro kvitování povelu na rozpojení vypínače VM. Celková priorita signálů je zřejmá z výše uvedeného schématu.

Možnost povelovat připojení a odpojení VM skrze proměnnou v rámci nastavení modulu synchronizace byla realizována s ohledem na možnosti funkcí MAS, potažmo chytrých sítí, kdy je

takto možné aplikovat například algoritmus VM, který dokáže povelovat jiné, sobě podřízené VM v dané síti/ostrově. I to je důvod, proč výstupy komunikačních modulů VM a agentů zahrnují informace o výkonových tocích.

Uživatelské nastavení je realizováno v modulu synchronizace:

- v (1.) záložce *Configuration*,
 - skupině 2. *Synchronization*,
 - parametr *Synchronization start time* – *sync_allow*,
 - parametr *Synchronization delay* – *sync_delay*,
 - parametr *Allow external sync. command?* – *ext_sync_enab*,
 - parametr *External sync. command* – *ext_sync_comm*,
 - skupině 3. *Disconnection*,
 - parametr *External disconnect variable* – *ext_disc*,
 - parametr *Disconnect at spec. time* – *disc_at_time*.

10.1.13 Výplňové moduly zdroje

Jak už bylo zmíněno v kapitole 7.4, komplexní model vyžaduje větší výpočetní čas při stejném výpočetním výkonu než model, který je vytvořen pro konkrétní požadavky simulace. Modulové uspořádání nabízí možnost nahrazení modulů, které jsou nepotřebné v konkrétní simulaci moduly, které jsou svým provedením jednoduché a plní pouze výplňovou funkci v rámci modelu. Moduly nelze z modelu přímo odstranit. Definované vstupy modulů totiž nesmí v programu PSCAD zůstat neobsazený.

Například pokud je cílem simulace ověřit vlastní nastavení zdroje bez nutnosti komunikace, lze modul určený pro komunikaci nahradit výplňovým modulem, který inhibuje všechny vstupní a výstupní signály. Trochu složitějším postupem, za znalosti návazností, které jsou dány popisem uvedeným v celé kapitole 10, lze samozřejmě inhibovat libovolnou část kterékoliv funkce či funkce celkově. Je však doporučeno provádět tyto úpravy vždy na vlastních uživatelských definicích a modulech vzniklých jako kopie definic a modulů zde uvedených.

Výplňový komunikace

Výplňový modul komunikace VM nemá žádné uživatelsky definované vstupy a celá jeho výstupní matice je reprezentována hodnotami 0.









Výplňový ochrany

Výplňový modul ochrany VM nemá žádné uživatelsky definované vstupy a oba jeho výstupy jsou reprezentovány hodnotou 0.

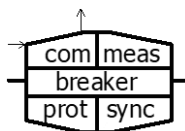
10.2 Agent

Pro možnost studia MAS v rámci spolupráce VM a IED v oblasti managementu provozu sítě s ohledem na různé provozní stavy jak zdrojů, tak samotné sítě, je nutné mít k dispozici model agenta. Požadavky na jeho funkce jsou definovány jak v popisné kapitole 5 – Multiagentní systémy, tak v kapitole 9.3 – Požadavky na model agenta. Model se skládá z pěti modulů, jejichž přehled a odkazy na jejich popisnou část reprezentuje tab. 10-3.

tab. 10-3: Základní návaznosti modulů modelu agenta

grafika	název modulu	název definice	popis na straně:
	Vypínač	<i>A_breaker</i>	227
	Měření	<i>A_meas</i>	230
	Komunikace	<i>A_com</i>	231
	Výplňový komunikace	<i>A_com_blank</i>	237
	Ochrany	<i>A_prot</i>	233
	Výplňový ochrany	<i>A_prot_blank</i>	237
	Synchronizace	<i>A_sync</i>	235
	Výplňový synchronizace	<i>A_sync_blank</i>	237

Struktura modelu agenta je uvedena na obr. 10-40.



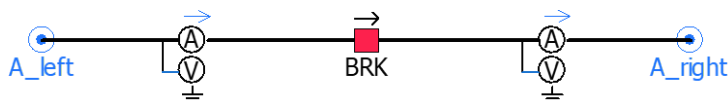
obr. 10-40: Základní struktura modelu agenta

10.2.1 Vypínač

Přímým, vlastním akčním členem agenta je v mnoha případech vypínač. Tento člen je při realizaci modelu agenta základním prvkem a prvním modulem, kolem kterého lze sestavit další moduly, které budou plnit požadované funkce agenta. Takto je možné realizovat základní funkci celé řady agentů (Zone Agent, Feeder Agent, Tie Agent, Sectionalizing Agent, Point of Common Coupling Agent atd.). Zde také vzniká jedna z důležitých informací, která je komunikována mimo agenta – stav vypínače (sepnuto/rozepnuto).

Agentu obecně lze přiřadit i určitou formu inteligence danou výpočetním algoritmem (například určitá forma učení, složitější rozhodovací algoritmy pro sepnutí/rozepnutí vypínače nebo naopak blokování změny jeho stavu apod.). Tyto algoritmy mohou být velmi různé, a proto v rámci modelu existuje pro uživatele otevřená možnost povelovat různé funkce agenta i pomocí externího signálu, právě skrze modul vypínače.

Schéma silové části modulu vypínače je na obr. 10-41. Výstupem prvků multimetrů jsou okamžité hodnoty fázových napětí a fáze napětí na levé, resp. pravé straně silového vypínače. Multimetr na levé straně navíc měří okamžitou hodnotu proudu všech fází pro určení všech ostatních potřebných parametrů elektrického obvodu. Všechny tyto měřené parametry jsou výstupem modulu vypínače, který se dále uplatní jako vstup modulu měření agenta. Poloha/stav prvku vypínače je řízen signálem *BRK*, který je výstupem funkce F40.



obr. 10-41: Schéma silové části modulu vypínače agenta

Uživatelské nastavení je realizováno:

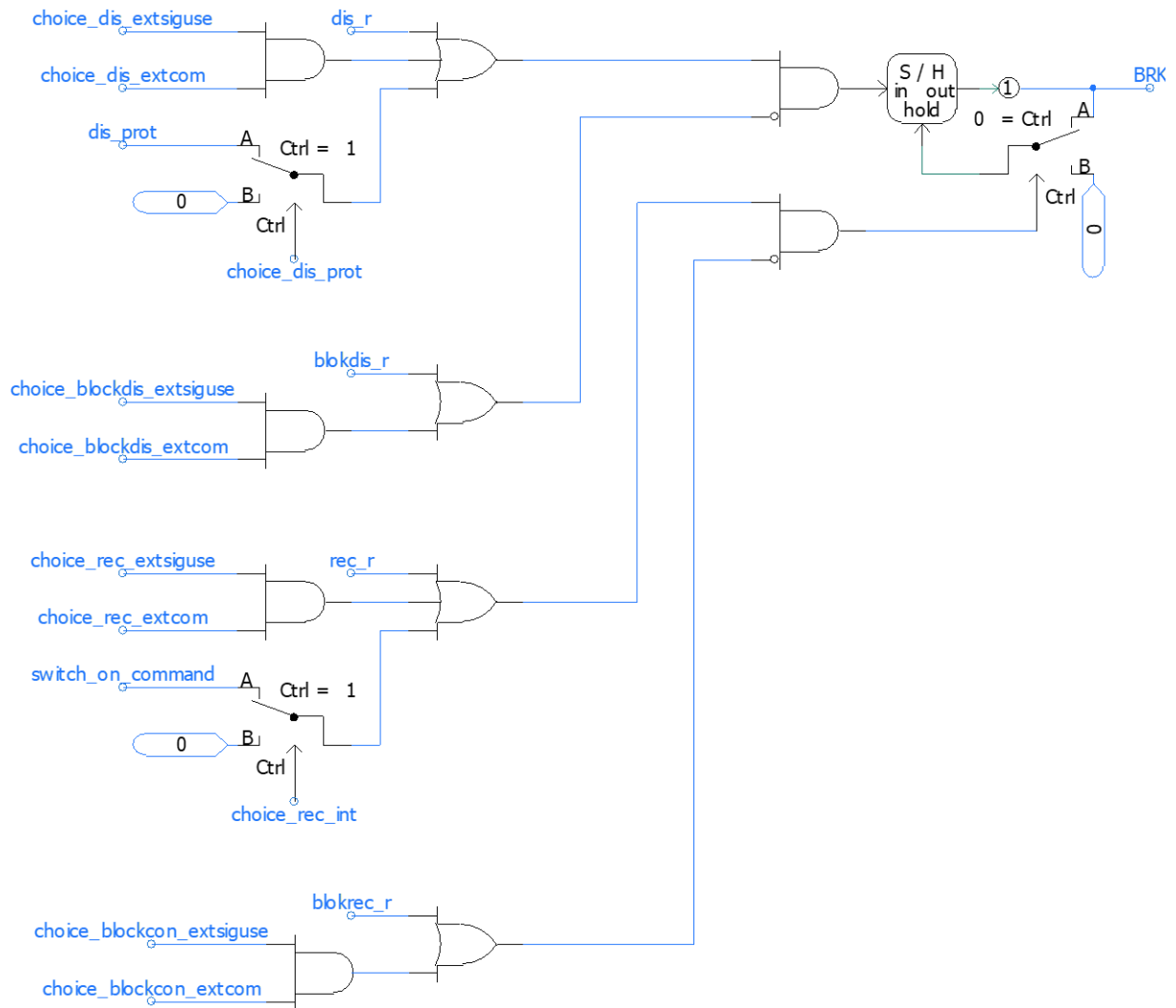
- v (1.) záložce *Configuration*,

- skupině *General*,
 - parametr *Name* – *Name*,
 - parametr *Un* (kV) – *A_Vn*,
 - parametr *fn* (Hz) – *A_fn*,
- v (2.) záložce *Disconnection*,
 - skupině *1 Disconnect*,
 - parametr *By protection (by prot module)* – *choice_dis_prot*,
 - parametr *By rule (1st)* – *choice_dis_rule1*,
 - parametr *By rule (2nd)* – *choice_dis_rule2*,
 - parametr *By rule (3rd)* – *choice_dis_rule3*,
 - parametr *By external signal* – *choice_dis_extsiguse*,
 - parametr *External switch command* – *choice_dis_extcom*,
 - skupině *2 Reconnection blockade*,
 - parametr *By external signal* – *choice_blockcon_extsiguse*,
 - parametr *External switch command* – *choice_blockcon_extcom*,
- v (3.) záložce *Re-connection*,
 - skupině *1 Re-connect*,
 - parametr *By internal evaluation (by sync module)* – *choice_rec_int*,
 - parametr *By rule (1st)* – *choice_rec_rule1*,
 - parametr *By rule (2nd)* – *choice_rec_rule2*,
 - parametr *By rule (3rd)* – *choice_rec_rule3*,
 - parametr *By external signal* – *choice_rec_extsiguse*,
 - parametr *External switch command* – *choice_rec_extcom*,
 - skupině *2 Connection blockade*,
 - parametr *By external signal* – *choice_blockdis_extsiguse*,
 - parametr *External switch command* – *choice_blockdis_extcom*.

Parametr *Name* je uživatelskou volbou pro zadání názvu modulu agenta dané instance, který se zobrazí pod modelem agenta. Parametry nominálních hodnot *A_Vn* a *A_fn* jsou komunikovány do modulu ochran pro možnost zadání limitů ochran v poměrných jednotkách. Volby výběru signálu dálkové komunikace pro odepnutí – *choice_dis_rule1*, *choice_dis_rule2* a *choice_dis_rule3*, resp. sepnutí – *choice_rec_rule1*, *choice_rec_rule2* a *choice_rec_rule3*, jsou posílány do modulu komunikace, který provede výběr požadovaných matic signálů. Ostatní signály se uplatní přímo v modulu vypínače, v rámci funkce F40.

F40 – Povelý a blokády vypínače

Řídící část modulu vypínače agenta zajišťuje funkce F40. Její schéma je na obr. 10-42, následovaným jeho popisem.



obr. 10-42: Schéma funkce F40 – Povelý a blokády vypínače

Funkce F40 je realizována logikou binárních signálů. Vstupní signály povolující rozeptnutí vypínače jsou (1.) *dis_r*, (2.) *choice_dis_extsiguse* v logickém součinu s *choice_dis_extcom*, které jsou volbou uživatele povolení vypnutí od uživatelské proměnné, resp. hodnoty signálu uživatelské proměnné, a (3.) *dis_prot*, který je výstupem modulu ochrany, resp. funkcí O01 až O06, a který musí být povolený uživatelskou volbou, která je reprezentována signálem *choice_dis_prot*.

Možnost blokády rozeptnutí je umožněna skrze signály (1.) *blokdis_r* a (2.) *choice_blockdis_extsiguse* v logickém součinu s *choice_blockdis_extcom*, které jsou volbou uživatele povolení blokování rozeptnutí vypínače od uživatelské proměnné, resp. hodnoty signálu dané uživatelské proměnné. Výstup těchto dvou možností blokad jsou skrze negovaný vstup přivedeny na blok logického součinu spolu se signálem pro rozeptnutí vypínače popsané v předchozím odstavci.

Vstupní signály povolující sepnutí vypínače jsou (1.) *rec_r*, (2.) *choice_rec_extsiguse* v logickém součinu s *choice_rec_extcom*, které jsou volbou uživatele povolení sepnutí od uživatelské proměnné, resp. hodnoty signálu dané uživatelské proměnné, a (3.) *switch_on_command*, který je výstupem modulu synchronizace, resp. funkce F41, a který musí být povolený uživatelskou volbou, která je reprezentována signálem *choice_rec_int*.

Možnost blokády sepnutí vypínače agenta je umožněna skrze signály (1.) *blokrec_r* a (2.) *choice_blockcon_extsiguse* v logickém součinu s *choice_blockcon_extcom*, které jsou volbou

uživatele povolení blokování sepnutí vypínače od uživatelské proměnné, resp. hodnoty signálu dané uživatelské proměnné. Výstup těchto dvou možností blokad jsou skrze negovaný vstup přivedeny na blok logického součinu spolu se signálem pro sepnutí vypínače popsané v předchozím odstavci.


Matice signálů *dis_r*, *blokdis_r*, *rec_r* a *blokrec_r* jsou signály vnější komunikace modelu agenta. Mohou tak přicházet od navoleného zdroje, jiného agenta či z komunikační ústředny aplikací libovolného algoritmu.

Výstupy povelů odpojení a připojení a jejich blokad vstupují do prvku funkce *Sample and Hold* a prvku výběrů. Uvedené řešení zapojení namísto použití SR klopného obvodu je zvoleno s ohledem na prioritu povelů odepnout a sepnout. Vyšší priorita je při zvoleném řešení na povelu odepnout, což je správné vzhledem k problematice elektrických obvodů, kdy je toto řešení považováno bezpečnější.

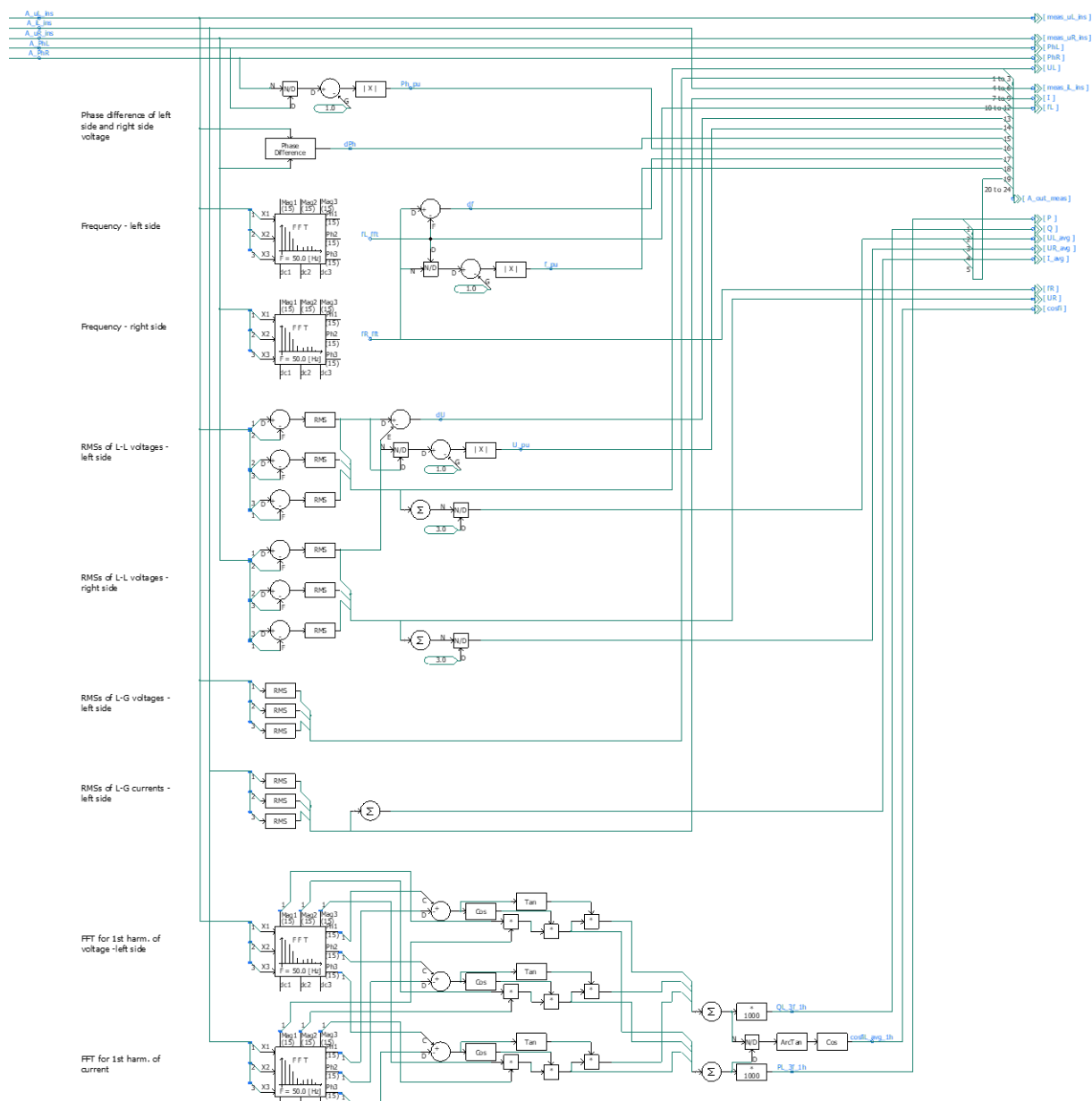
10.2.2 Měření

Modul měření zajišťuje zpracování měření okamžitých hodnot napětí na levé a pravé straně vypínače agenta a okamžité hodnoty proudu tekoucí skrze vypínač (měřeno na levé straně). Na základě těchto veličin dopočítává další parametry, které jsou důležité pro funkce ochrany a funkce modulu synchronizace. Mimo to poskytuje uživateli přehled o měřených i dopočítávaných parametrech.

V následujícím popisu je pro dvojici měření použito označení s indexem *L*, resp. *R*. Symbol *L* označuje levou stranu agenta – *Left*, symbol *R* označuje pravou stranu agenta – *Right*, z pohledu od prvku vypínače. Finální struktura modulu měření byla realizována s ohledem na přehlednost a možnost případných dalších úprav.

Celkové schéma modulu měření agenta je uvedeno na obr. 10-43. Uživatelskými výstupy jsou parametry uvedené v prvku exportu ( [parametr]). Výstupy matice signálů *A_out_meas* jsou použity v dalších modulech modelu agenta.

Algoritmy určování jednotlivých parametrů jsou obdobné jako u modulu měření zdroje uvedené v kapitole 10.1.4 (od strany 169).



obr. 10-43: Schéma modulu měření agenta

10.2.3 Komunikace

Modul komunikace zajišťuje návaznosti v rámci funkce F42 – Vnější komunikace modelu agenta. Funkci lze, podobně jako u modulu komunikace VM, rozdělit na dvě části. První část zpracovává signály vstupující do modelu agenta a druhá část zajišťuje výstupní informace a jejich formát.

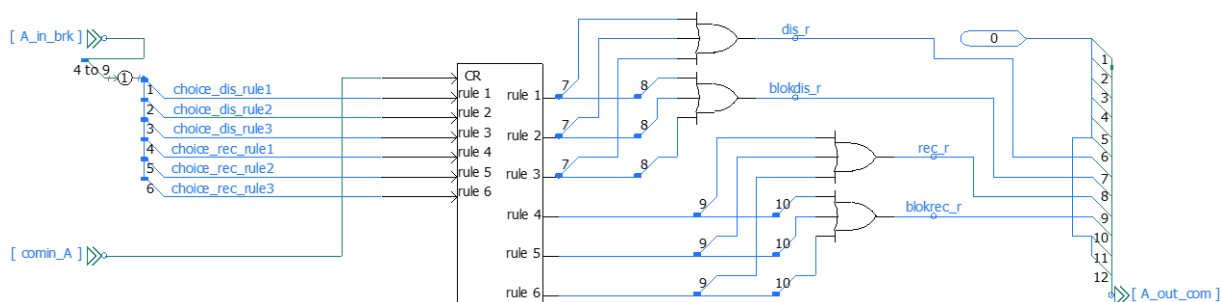
F42 – Vnější komunikace agenta

V tab. 10-4 je uveden formát vstupních a výstupních informací modelu VM spolu s určením pozice a popisem signálu.

tab. 10-4: Externí vstupní a výstupní signály modelu agenta

typ	pozice	signál	popis
Vstupní	1-6	0	
	7	<i>dis_r</i>	Povel pro rozpojení vypínače agenta.
	8	<i>blokdís_r</i>	Blokáda povelu pro rozpojení vypínače agenta.
	9	<i>rec_r</i>	Povel pro sepnutí vypínače agenta.
	10	<i>blokrec_r</i>	Blokáda povelu pro sepnutí vypínače agenta.
	11-12	0	
Výstupní	1	<i>BRK</i>	Poloha vypínače agenta.
	2	<i>P</i>	Velikost činného výkonu tekoucího skrze agenta (kladná hodnota znamená tok činného výkonu ve směru zleva).
	3	<i>Q</i>	Velikost jalového výkonu tekoucího skrze agenta (kladná hodnota znamená tok jalového výkonu induktivního charakteru ve směru zleva).
	4	<i>UL</i>	Aktuální průměrná hodnota sdružených napětí VM na levé straně agenta.
	5	<i>UR</i>	Aktuální průměrná hodnota sdružených napětí VM na pravé straně agenta.
	6	<i>I</i>	Aktuální průměrná hodnota proudů jednotlivých fází tekoucí skrze agenta (kladná hodnota znamená tok proudu zleva).
	7	<i>du</i>	Rozdíl velikostí efektivních hodnot napětí první fáze levé a pravé strany agenta.
	8	<i>dPh</i>	Rozdíl fází napětí levé a pravé strany agenta.
	9	<i>df</i>	Rozdíl velikostí frekvencí levé a pravé strany agenta.
	10-12	0	

Vstupem modulu je signál dálkové komunikace – *comin_A*. Tzv. pravidlo, podle kterého se bude daný VM řídit je definováno v rámci uživatelského rozhraní modulu vypínače agenta a je označen názvem *choice_rule1* až *choice_rule6*. Tyto signály vstupují do definice *DG_com_ruler*. Výběr vstupů z dálkové komunikace je zobrazeno na obr. 10-44.



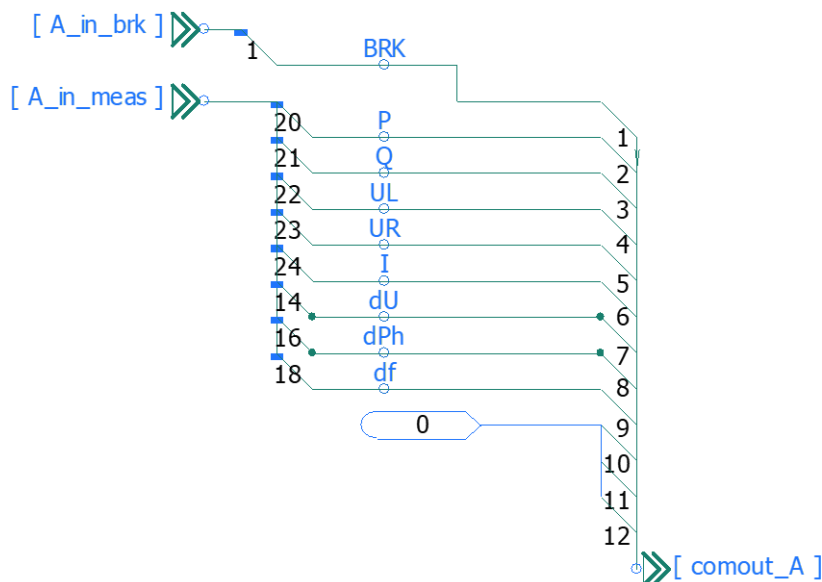
obr. 10-44: Schéma funkce F42 – Vnější komunikace agenta – část vstupů

definice *A_com_ruler*

Tato definice má za úkol na základě volby požadované skupiny komunikačního signálu vyčlenit právě tyto požadované signály na své výstupy. Definice je totožná s definicí *DG_com_ruler* uvedenou v kapitole 10.1.6 na straně 175.

Výstup signálů *dis_r*, *blokdir_r*, *rec_r* a *blokre_r* (pozice 7, 8, 9 a 10) pak vstupují na člen logického součtu. Tyto parametry se uplatní v modulu vypínače agenta v rámci funkce F40 – Pověly a blokády vypínače.

Schéma, pomocí kterého se formuje výstupní signál modulu komunikace VM pro vnější komunikaci – *comout_A*, je zobrazeno na obr. 10-45.



obr. 10-45: Schéma funkce F42 – Vnější komunikace agenta – část výstupů

Signály vstupující do schématu řazení jsou popsány v předchozí tabulce. Takto vzniklý výstupní signál *comout_A* opouští modul komunikace v podobě externího signálu.

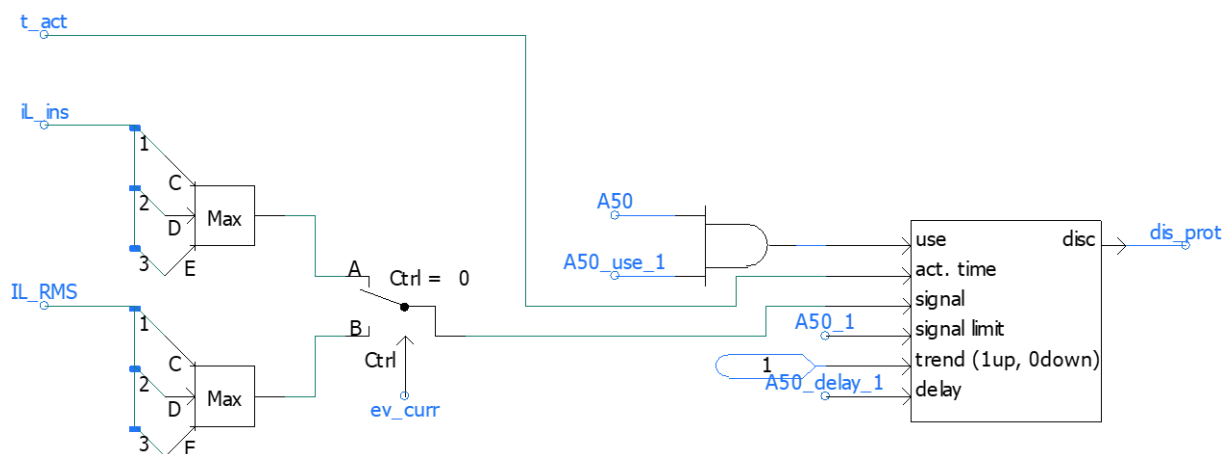
10.2.4 Ochrany

Modul ochran aplikovaný v modelu agenta je oproti modulu ochran VM zjednodušen hned v několika oblastech. U modelu agenta není třeba řešit provozní stav zdroje s tím i platnost ochranného stupně v daném stavu, ani typ výstupního signálu ochrany (povel ostrov nebo povel odpojení). Výsledkem tak je aplikace použité definice *A_prot_stage*, která je popsána v rámci popisu funkce O06 – ANSI 50. Výstupem modulu ochran je signál *dis_prot*, který se uplatňuje ve funkci F40 – Pověly a blokády vypínače v modulu vypínače.

Celkem je v rámci modulu ochrany agenta použito vždy po dvou stupních podpětového relé (ANSI 27), nadpětového relé (ANSI 59), nadproudového relé (ANSI 50), podfrekvenčního relé (ANSI 81U), nadfrekvenčního relé (ANSI 81O) a relé typu RoCoF (ANSI 80R). Nastavení a konfigurace je stejné jako u modulu ochran VM, avšak bez již zmíněných platností v různých stavech a režimech. Popis funkcí O01 až O05 je uveden v rámci kapitoly 10.1.11, od strany 216.

O06 – ANSI 50

Na obr. 10-46 je uvedeno schéma následované popisem schématu a popisem uživatelského nastavení pro jeden stupeň dané ochrany. V rámci modulu ochran je pro tento typ ochrany umožněno použít dvou stupňů ochrany. Uvedený popis je vztažen k jednomu ze stupňů, což je pro signály specifické pro nastavení daného stupně odlišeno indexem *_I*.



obr. 10-46: Schéma funkce O06 – ANSI 50

Povolení použití všech stupňů nadproudové ochrany je inicializováno volbou **A50**, která při volbě „yes“ povoluje nastavení příslušných parametrů v záložce ANSI 50 modulu ochrany – pro oba stupně ochrany. Volba **A50_use_1** pak povoluje použití daného stupně ochrany.

Funkce je z velké části řešená definicí **A_prot_stage**. Vstupní signál s označením signal, který je nutné přivést na vstup definice je vytvořen na základě volby **ev_curr**, která je uživatelskou volbou typu proudu použitého pro funkci ochrany. Při volbě „instantaneous“ je pracováno s nejvyšší okamžitou hodnotou proudu. Signál je získán z modulu měření skrze signál **iL_ins** a funkci výběru maxima. Při volbě „RMS“ je pracováno s nejvyšší efektivní hodnotou proudu v daném čase. Signál je v tomto případě získán z modulu měření skrze signál **IL_RMS**, funkci výběru maxima.

definice **A_prot_stage**

Výstupem definice **A_prot_stage** je signál **dis_prot**.

Práce algoritmu, který se skrývá v definici, je inicializována jednak v případě volby „yes“ signálu **A50_use_1**, který je uživatelskou volbou povolení uplatnění daného stupně ochrany (volba „no“ blokuje funkci daného stupně ochrany), a jednak až po uplynutí času **t_act**, který je společný pro všechny funkce v rámci modulu ochrany agenta. Dalším vstupem je samotný porovnávaný signál. Tento vstupní signál je v algoritmu definice porovnáván se signálem **A50_1**, který je uživatelem nastaven jako prahová hodnota, jejíž překročení vede ke změně hodnoty výstupu definice. To, jestli je hlídáno překročení nebo podkročení prahové hodnoty je definováno binární hodnotou na vstupu s označením **trend (1up, 0down)**. Signál s hodnotou jedna na tomto vstupu vede k tomu, že k popudu pro změnu hodnoty výstupu definice vede stav, kdy hodnota signálu na vstupu **signal** je větší než hodnota signálu na vstupu **signal limit**. Logicky, obráceně to platí při hodnotě nula na vstupu **trend (1up, 0down)**. Pro funkci nadproudového relé je zřejmé, že hodnota tohoto vstupu bude nabývat právě hodnoty jedna. Po podkročení prahové hodnoty se uplatňuje část algoritmu, kde hraje roli nastavená hodnota signálu **A50_delay_1**, která je funkcí časového zpoždění změny výstupu definice. Prahová hodnota musí být překročena po celou dobu časového zpoždění.

Definice neobsahuje možnost uplatnění resetu. To není standartním provedením ochranné funkce, nicméně toto řešení bylo zvoleno s ohledem na proces, který řeší další návaznosti výstupních signálů. Návaznostmi v modulu vypínače agenta je totiž aktivován prahový obvod, který vede k aktivaci určité návaznosti i v případě, kdy se sledovaný parametr navrátí zpět pod prahovou hodnotu. Z toho důvodu není třeba řešit resetování přímo v rámci funkce ochrany.

Zdrojový kód definice *A_prot_stage*:

```
#INCLUDE 's1.h'
#include 'emtstor.h'
#LOCAL REAL buff
#LOCAL INTEGER trig

buff = STORF(NSTORF)
trig = STORI(NSTORI)

IF (time == delt) THEN
    buff = 0
    trig = 0
    stav = 0
ENDIF

$disc = 0

IF ($use == 1 .AND. time >= t_act) THEN

    IF (($trend == 1 .AND. $sig >= $siglim) .OR.
        ($trend == 0 .AND. $sig <= $siglim)) THEN
        buff = buff + delt
    ENDIF

    IF (($trend == 1 .AND. $sig < $siglim) .OR.
        ($trend == 0 .AND. $sig > $siglim)) THEN
        buff = 0
        trig = 0
    ENDIF

    IF (buff > $delay) THEN
        trig = 1
    ENDIF

    IF (trig == 1) THEN
        $disc = 1
    ENDIF

    ENDIF

    STORF(NSTORF) = buff
    STORI(NSTORI) = trig

    NSTORF = NSTORF + 1
    NSTORI = NSTORI + 1
ENDIF
```

Uživatelské nastavení je realizováno v modulu ochran:

- v (1.) záložce *Configuration*,
 - skupině *All general*,
 - parametr *Activation time* – *t_act*,
 - skupině *Protection functions*,
 - parametr *Evaluated current* – *ev_curr*,
 - parametr *Allow ANSI 50 - OverCurrent* – *A50*,
- v (3.) záložce *ANSI 50*,
 - skupině *Stage 1*,
 - parametr *Use stage?* – *A50_use_1*,
 - parametr *I+ stage 1* – *A50_1*,
 - parametr *I+ stage 1 delay* – *A50_delay_1*.

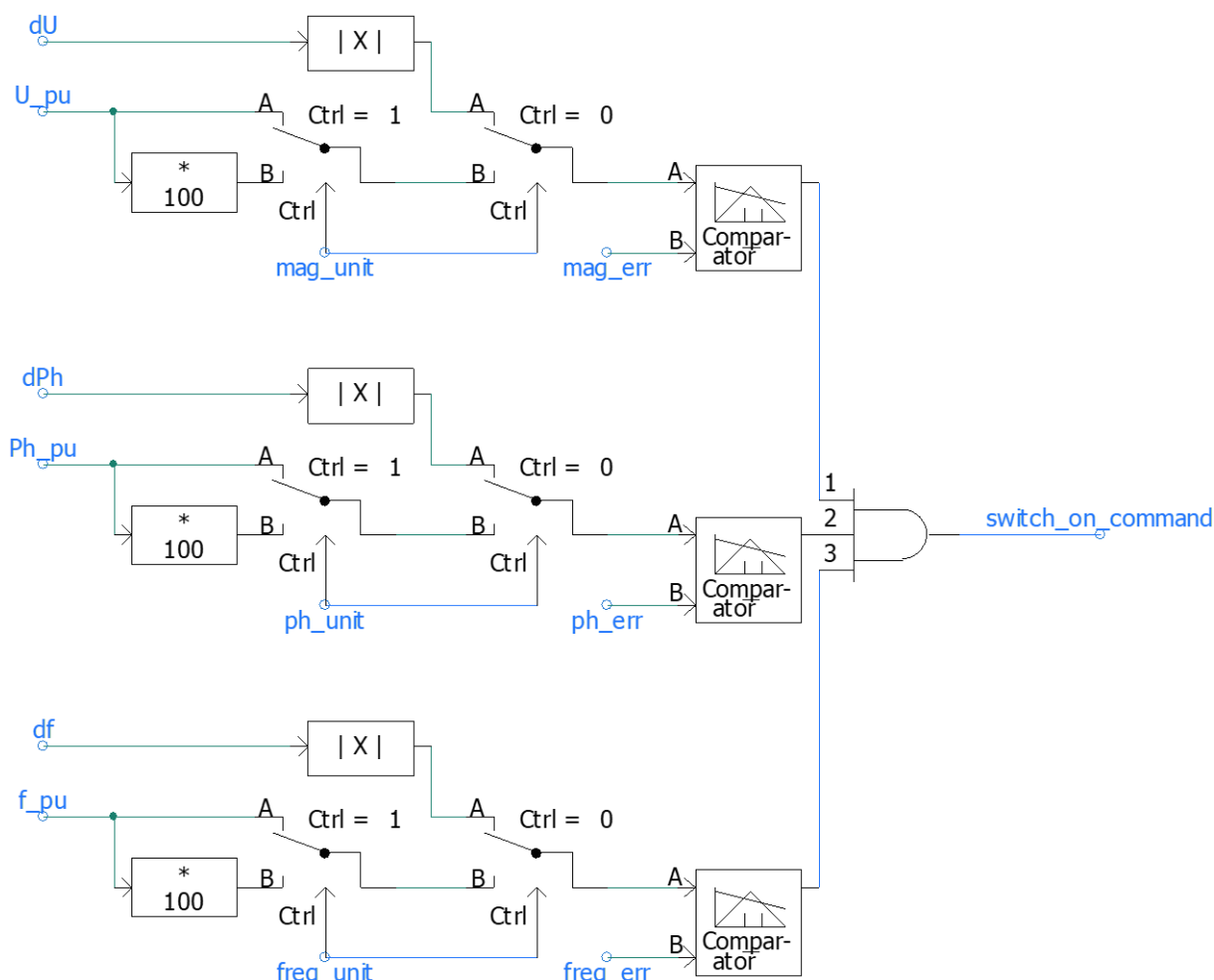
Stejně možnosti nastavení v rámci záložky *ANSI 50* jsou realizované i pro stupeň číslo 2 (značeny indexem *_2*) nastavitelný ve skupině *Stage 2*.

10.2.5 Synchronizace

Modul synchronizace agenta řeší splnění fázovacích podmínek aplikací funkce F41.

F41 – Fázovací podmínky agenta

Algoritmus funkce F41 řeší vyhodnocení splnění fázovacích podmínek velikosti fázových napětí, fázových úhlů napětí a frekvence napětí. Realizace funkce F41 je uvedena na obr. 10-47.



obr. 10-47: Schéma funkce F41 – Fázovací podmínky agenta

Vstupní signály jsou přijímány z modulu měření. Pro podmínku velikosti efektivních hodnot sdružených napětí na obou stranách vypínače je pracováno velikostí rozdílu sdružených napětí první a druhé fáze na levé a pravé straně vypínače agenta – dU nebo jeho poměrnou hodnotou U_{pu} . Signál je porovnán s uživatelem zadanou limitou pro splnění dané podmínky – mag_err . Uživatelskou volbou mag_unit jsou voleny jednotky, potažmo i signál pro porovnání. Zde jsou volby „%“, „kV“ nebo „p.u.“.

V principu stejně funguje algoritmus ověření fázovací podmínky rozdílu fázových úhlů. Zde je vstupním signálem buď absolutní hodnota rozdílu fázového posunu – dPh , nebo jeho poměrná hodnota – Ph_{pu} . Požadovaná hodnota je porovnána s uživatelem nastavenou mezní hodnotou pro splnění podmínky – ph_err . Uživatelskou volbou ph_unit jsou voleny jednotky, potažmo i signál pro porovnání. Zde jsou volby „%“, „deg“ nebo „p.u.“.

V principu stejně funguje i algoritmus ověření fázovací podmínky rozdílu velikostí frekvence. Zde je vstupním signálem buď absolutní hodnota rozdílu frekvence na levé a pravé straně vypínače – df , nebo jeho poměrná hodnota – f_{pu} . Požadovaná hodnota je porovnána s uživatelem nastavenou mezní hodnotou pro splnění podmínky – $freq_err$. Uživatelskou volbou $freq_unit$ jsou voleny jednotky, potažmo i signál pro porovnání. Zde jsou volby „%“, „Hz“ nebo „p.u.“.

Výstup algoritmů je přiveden na vstup logického součinu. Splněním fázovacích podmínek tak výstupní signál $switch_on_command$ nabývá hodnoty logické 1. Ten pak vstupuje do algoritmu funkce F40 v rámci modulu vypínače.

Uživatelské nastavení je realizováno v modulu synchronizace:

- v (1.) záložce *Internal reconnection evaluation setting*,
 - skupině 1. *Voltage magnitude condition*,
 - parametr *Voltage magnitude deviation* – *mag_err*,
 - parametr *Units* – *mag_unit*,
 - skupině 2. *Phase condition*,
 - parametr *Phase deviation* – *ph_err*,
 - parametr *Units* – *ph_unit*,
 - skupině 3. *Frequency condition*,
 - parametr *Frequency deviation* – *freq_err*,
 - parametr *Units* – *freq_unit*.

10.2.6 Výplňové moduly agenta

Výplňové moduly modelu agenta lze využít při konkretizaci typu agenta. Široké možnosti nastavení samotných modulů agenta nabízí možnost při určitých simulacích nahradit funkci daného modulu povelom uživatele tak, jak je potřeba v rámci dané studie. Aplikací výplňových modulů lze dosáhnout zmenšení výpočetní náročnosti simulace. Z realizace provedení modelu agenta vznikla možnost použít následující tři výplňové moduly.

Výplňový komunikace

Výplňový modul komunikace agenta nemá žádné uživatelsky definované vstupy a celá jeho výstupní matice je reprezentována hodnotami 0.

Výplňový ochrany

Výplňový modul ochran agenta nemá žádné uživatelsky definované vstupy a jeho výstup je reprezentován hodnotou 0.

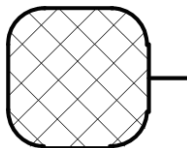
Výplňový synchronizace

Výplňový modul synchronizace agenta nemá žádné uživatelsky definované vstupy a jeho výstup je reprezentován hodnotou 0.

10.3 Sítě

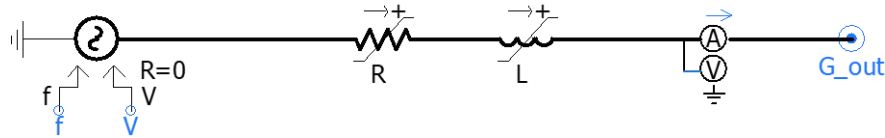
Model sítě je důležitou návazností pro možnosti realizace simulací souladu a celé řady dalších simulací, které mají ověřit vlastnosti a funkce modelů VM, potažmo i agentů. Model sítě sestává z jednoho modulu, jehož vnitřní schéma se skládá ze silové části a části výpočtové/funkční.

Struktura modelu agenta je uvedena na obr. 10-48.



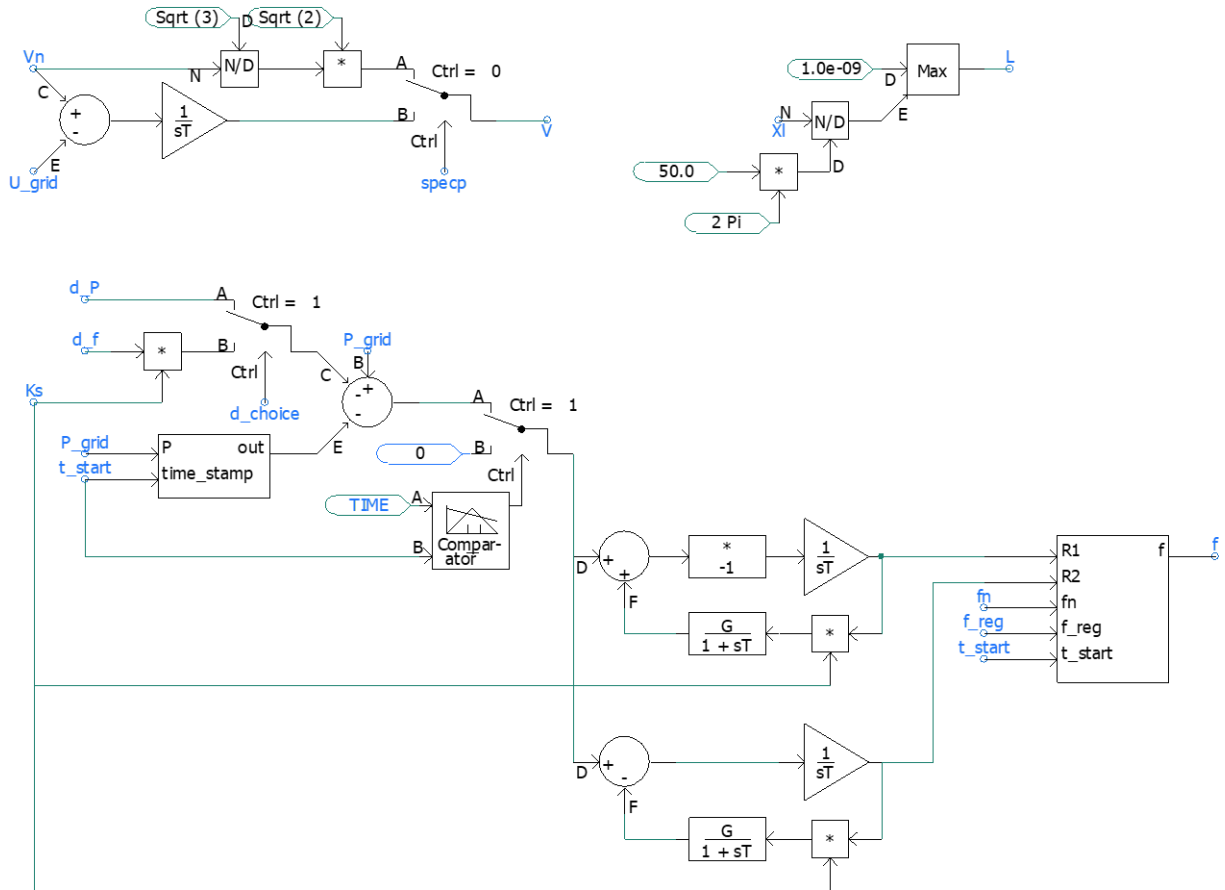
obr. 10-48: Grafická podoba modelu sítě

Schéma *modelu sítě* je uvedeno na obr. 10-49 a obr. 10-50 následované jejich popisem.



obr. 10-49: Schéma silové části modelu sítě

Pro model sítě byl použit prvek napětového zdroje, jehož parametry frekvence a napětí jsou přivedeny pomocí signálu f a V . Ty jsou generovány algoritmy funkční části modelu sítě. Prvek napětového zdroje nastaven jako ideální. Impedance sítě je tak dána skrze nastavení prvků resistance a indukance, skrze proměnné R a L . Hodnota odporu prvku resistance je dána přímo uživatelskou volbou. Hodnota indukčnosti prvku indukance je dána výpočtem na základě uživatelského nastavení induktivní reaktance – XI , podle algoritmu uvedeného v pravé horní části na obr. 10-50. Prvek multimetru slouží k získání zpětné vazby o výstupní hodnotě sdruženého napětí – U_{grid} a činného výkonu – P_{grid} dodávaného do výstupu elektrického signálu G_{out} .



obr. 10-50: Schéma funkční části modelu zdroje

V levé horní části schématu obr. 10-50 je uveden algoritmus tvorby požadované hodnoty výstupního napětí sítě – V . Velikost je dána uživatelským nastavením požadované hodnoty napětí sítě – Vn a volbou *specp*, která určuje místo, kde má být dané napětí Vn udržováno. Volbou „*behind the source impedance*“ je požadované napětí Vn udržováno na výstupu prvku napětového zdroje. Výstupní napětí modelu sítě tak bude ovlivněno velikostí nastavené impedance (R a XI) a velikostí toku výkonu (resp. proudu). Tímto nastavením tak lze uvažovat takzvanou tvrdost sítě. Volbou „*at the terminal*“ je požadované napětí Vn udržováno na výstupních svorkách modelu sítě. Funkci udržování požadované hodnoty napětí lze ovlivnit uživatelskou volbou nastavení časové konstanty

integrátoru – *TC_R3*, který se stará o regulační odchylku žádaného napětí V_n a výstupního napětí U_{grid} .

Ve spodní části schématu obr. 10-50 je uveden algoritmus tvorby požadované hodnoty výstupní frekvence modelu sítě – f . Tím je také určena míra implementace automatické regulace frekvence. S odkazem na teoretický popis v kapitole 2.3 lze frekvenční odezvu primární regulace frekvence realizovat připojením zpětnovazební smyčky (reprezentující výkonové číslo soustavy a zpoždění primární regulace) k integračnímu členu, který reprezentuje frekvenční odezvu systému. Řešením, které vychází z následujícího popisu, se dá v případě potřeby simulovat i sekundární regulace P a f . Určujícím prvkem je definice *GRID_reg_choice*.

definice *GRID_reg_choice*

Ústřední uživatelskou volbou definice je volba *f_reg*, která určuje závislost frekvence sítě na bilanci činného výkonu sítě. Volba „*ideal*“ znamená ideální zdroj, jinými slovy tvrdou síť, s výkonovým číslem jdoucím k nekonečnu. Volba „*w PC*“ (– with primary control – s primární regulací) znamená chování sítě jako zdroje s primární regulací frekvence, jejíž parametry lze dále nastavit. Volba „*w/o PC*“ (– without PC – bez primární regulace) znamená, že se síť chová jako zdroj bez primární regulace frekvence. Definice *GRID_reg_choice* tak řeší právě tuto návaznost. V případě volby ideálního zdroje je výstupem definice hodnota uživatelsky zvolené nominální frekvence sítě – f_n . V případě volby primární regulace je výstupem součet nominální hodnoty frekvence a vstupu $R1$ a vstupu $R2$. V případě volby bez primární regulace je výstupem součet nominální hodnoty frekvence a vstupu $R1$. Pro možnost správné inicializace simulace je v rámci definice *GRID_reg_choice* implementováno časové zpoždění aplikace voleb s primární regulací a bez primární regulace skrze uživatelsky nastavitelnou proměnnou t_{start} .

Zdrojový kód definice *GRID_reg_choice*:

```
#INCLUDE 's1.h'

IF ($f_reg == 3) THEN
    $f = $fn
ELSE IF ($f_reg == 2 .AND. time < $t_start) THEN
    $f = $fn
ELSE IF ($f_reg == 2) THEN
    $f = $fn + $R1 + $R2
ELSE IF ($f_reg == 1 .AND. time < $t_start) THEN
    $f = $fn
ELSE IF ($f_reg == 1) THEN
    $f = $fn + $R1
ENDIF
```

Vstupem $R1$ definice *GRID_reg_choice* je realizována simulace odezvy frekvenční odchylky. Výkonovou dysbalanci tak vzniká úměrně odchylka frekvence. Úměrnost vniklé odchylky je dána uživatelsky zvoleným výkonovým číslem – K_s a chování integrátoru a přenosové funkce zpětné vazby, které musí být aplikovány z důvodu možnosti nastavení odpovídajícího/požadovaného chování sítě lze nastavit skrze uživatelské proměnné *TC_R1* – časová konstanta integrátoru zpracování frekvenční odchylky a *TC_R1fb* – časová konstanta zpoždění zpětné vazby zpracování frekvenční odchylky.

Vstupem $R2$ definice *GRID_reg_choice* je realizována simulace odezvy primární regulace frekvence. Ta reaguje opět na dysbalanci výkonu a její chování se odvíjí od nastaveného výkonového čísla sítě – K_s a nastavení uživatelské proměnné *TC_R2* – časová konstanta integrátoru primární regulace a *TC_R2fb* – časová konstanta zpoždění zpětné vazby primární regulace.

Dysbalance výkonu je nulová, až do uplynutí času t_{start} – to je zajištěno komparátorem s úrovnovým výstupem porovnávající hodnotu proměnné t_{start} s časem simulace. V definici *GRID_time_stamp* dojde v čase t_{start} k zapamatování aktuálního výkonu sítě – P_{grid} , který je pak po zbytek simulace odečítán od vždy nové aktuální hodnoty výkonu sítě. Do součtového členu

ještě vstupuje uživatelem definovaná požadovaná odchylka činného výkonu – d_P nebo požadovaná odchylka frekvence – d_f . Hodnota frekvenční odchylky je přepočítána na odchylku výkonu součinem s výkonovým číslem K_s . To, jestli se uplatní vnucená deviace na základě výkonu nebo frekvence je dána volbou d_choice .

definice GRID_time_stamp

Zdrojový kód definice *GRID_time_stamp*:

```
#INCLUDE 's1.h'
#LOCAL REAL out_stamp

out_stamp = STORF(NSTORF)

IF (time < $time_stamp) THEN
    out_stamp = $P
ENDIF
```

```
$out = out_stamp

STORF(NSTORF) = out_stamp
NSTORF = NSTORF + 1
```

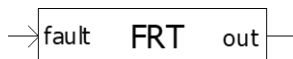
Uživatelské nastavení je realizováno:

- v (1.) záložce *Configuration*,
 - skupině *General*,
 - parametr *Name* – $Name$,
 - parametr *Frequency response* – f_reg ,
 - parametr *Specified Parameters* – $specp$,
 - parametr *Nominal voltage* – V_n ,
 - parametr *Nominal frequency* – f_n ,
 - parametr *Nominal phase* – Ph_n ,
 - parametr *Time constant of U response* – TC_R3 ,
 - skupině *Impedance*,
 - parametr *Resistance* – R ,
 - parametr *Inductive reactance* – X_l ,
- v (2.) záložce *Frequency dependence setup*,
 - skupině *General*,
 - parametr *Start time* – t_start ,
 - parametr *Grid K-factor* – K_s ,
 - parametr *Forced deviation* – d_choice ,
 - parametr *Forced frequency deviation (Hz)* – d_f ,
 - parametr *Forced power deviation (MW)* – d_P ,
 - parametr *Time constant of df response* – TC_R1 ,
 - parametr *Time constant of df response feedback* – TC_R1fb ,
 - parametr *Time constant of PC* – TC_R2 ,
 - parametr *Time constant of PC feedback* – TC_R2fb .

10.4 Ostatní

10.4.1 Fault-ride-through

Prvek *Fault-ride-through* (definice *FRT*) je pomocným prvkem při simulacích majících účel ověřit schopnosti VM překlenout poruchu. Funkce tohoto prvku je odkazem na požadavek RfG čl. 14.3, resp. čl. 16.3, kde je stanoven průběh dolní limity – profil schopnosti VM překlenout poruchu, pro různé typy VM. Schopností tohoto prvku je právě vykreslení zmíněných profilů.



obr. 10-51: Grafika modelu FRT

Vstupním signálem prvku – definice, je signál *fault*. Na vstup musí být přiveden binární signál, který definuje začátek poruchy. (Obvykle se jedná o signál prvku časovače poruchy (prvek Timed Breaker Logic), který se dá s výhodou použít pro simulaci vyvolání poruchy v síti.) V nastavení modulu je nutné výběrem proměnné *TT* zvolit, zdali je porucha definována signálem 0 (volba „*I* -> 0“) nebo 1 (volba „0 -> *I*“). Uživatel dále může nastavit časový parametr *t_start*, který definuje čas simulace, od kterého má být tento prvek aktivní – až po překročení tohoto nastaveného času prvek reaguje na změnu vstupu *fault*.

Výstupem definice je reálný signál *out*, který lze v grafu vykreslit jako průběh dolní limity pro ověření schopnosti VM překlenout poruchu. Výstupem je pak graf podobný tomu na obr. 3-10 nebo obr. 3-11 (strana 60). Samozřejmostí je možnost definice parametrů tak jak je určuje RfG. Vstupy nastavení modulu tak tvoří parametry napětí *Uret* – zůstatkové napětí v místě připojení během poruchy, *Uclear* – napětí v okamžiku odstranění poruchy, *Urec1* a *Urec2* – konkrétní body dolního limitu obnovení napětí po odstranění poruchy; a parametry času *tclear* – čas odstranění poruchy a *trec1*, *trec2* a *trec3* – konkrétní body dolního limitu obnovení napětí po odstranění poruchy. Napěťové parametry jsou zadávány v poměrných jednotkách vztažených k nominálnímu napětí v místě připojení zdroje. Časové parametry jsou v jednotkách sekund. Všechny napěťové i časové parametry mají předepsané limity min a max korespondující s požadavky RfG.

Zdrojový kód definice *FRT*:

```

#include 's1.h'
#include 'emtstor.h'
#LOCAL REAL pot, t_rec1, t_rec2, t_rec3
#LOCAL REAL mem
#LOCAL INTEGER trip

pot = STORF(NSTORF)
mem = STORF(NSTORF + 1)
trip = STORI(NSTORI)

IF (time == delt) THEN
    trip = 0
    pot = 0
    mem = $Urec2
ENDIF

IF (time >= $t_start .AND. trip == 0) THEN
    IF ($TT == 0) THEN
        IF ($fault == 0) THEN
            trip = 1
        ENDIF
    ENDIF
    IF ($TT == 1) THEN
        IF ($fault == 1) THEN
            trip = 1
        ENDIF
    ENDIF
ENDIF

IF (trip == 0) THEN
    $out = 1
ENDIF

IF (trip == 1) THEN
    t_rec1 = $trec1
    t_rec2 = $trec2
    t_rec3 = $trec3
    pot = pot + delt
    IF ($trec1 == $tclear) THEN
        t_rec1 = $trec1 + 0.000001
    
```

```

    IF (pot < $tclear) THEN
        $out = $Uret
    ENDIF
    IF ($tclear <= pot .AND. pot < $trec1) THEN
        $out = $Uclear + ((pot - $tclear) *
        (($Urec1 - $Uclear)/(t_rec1 - $tclear)))
    ENDIF
    IF ($trec1 <= pot .AND. pot < $trec2) THEN
        $out = $Urec1
    ENDIF
    IF ($trec2 <= pot .AND. pot <= $trec3) THEN
        $out = $Urec1 + ((pot - $trec2) *
        (($Urec2 - $Urec1)/(t_rec3 - $trec2)))
    ENDIF
    IF ($trec3 <= pot) THEN
        $out = mem
        IF ($trec3 + $t_prodleava <= pot)
            THEN
                mem = mem + $V_jump
                $out = MIN(mem, 1.0)
                pot = pot - $t_prodleava
                IF (mem >= 1) THEN
                    mem = 1
                    pot = pot - delt
                ENDIF
            ENDIF
        ENDIF
    ENDIF

    STORF(NSTORF) = pot
    STORF(NSTORF + 1) = mem
    STORI(NSTORI) = trip

    NSTORF = NSTORF + 2
    NSTORI = NSTORI + 1
  
```



```

ENDIF
IF ($trec3 == $trec2) THEN
    t_rec3 = $trec3 + 0.000001
ENDIF

```

Uživatelské nastavení je realizováno:

- v (1.) záložce *Configuration*,
 - skupině *General*,
 - parametr *Active from (s)* – *t_start*,
 - parametr *Trigger type* – *TT*,
 - skupině *Time parameters*,
 - parametr *t clear (s)* – *tclear*,
 - parametr *t recovery 1 (s)* – *trec1*,
 - parametr *t recovery 2 (s)* – *trec2*,
 - parametr *t recovery 3 (s)* – *trec3*,
 - skupině *Voltage parameters*,
 - parametr *U retained (pu)* – *Uret*,
 - parametr *U clear (pu)* – *Uclear*,
 - parametr *U recovery 1 (pu)* – *Urec1*,
 - parametr *U recovery 2 (pu)* – *Urec2*,
- v (2.) záložce *Return to nominal*,
 - skupině *General*,
 - parametr *Delay* – *t_prodleva*,
 - parametr *Voltage jump* – *V_jump*.

11 SIMULACE PRO VALIDACI MODELŮ

Cílem této kapitoly je popis sestavených projektů a provedených simulací, které mají za cíl ověřit správnou funkčnost vytvořených modelů. S odkazem na hlavní cíle této práce bylo v této kapitole čerpáno z metodiky ověření souladu s požadavky RfG pro VM typu C a D, konkrétně z její druhé fáze: Simulace souladu pro synchronní a nesynchronní výrobní moduly [50], která je publikována na webových stránkách ČEPS, a.s. [15], a která definuje požadavky na provedení simulací s cílem ověřit některé funkce modelů VM. Podrobněji rozebírá a popisuje požadavky na VM a simulace souladu [125], ze které byly čerpány některé doplňující informace.

Simulace souladu s požadavky RfG jsou doplněny dalšími simulacemi, které ověřují další funkce jednak modelů VM a jednak dalších modelů sestavených v rámci této práce. V tab. 11-1 je uveden přehled projektů simulací, které byly sestaveny v rámci fáze validace modelů.

tab. 11-1: Přehled validačních simulací

kapitola	název	projekt
11.1.1	Simulace odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci (LFSM-O)	SMe01U.pscx SMe01IBG.pscx SMe01SG.pscx
11.1.2	Simulace odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při podfrekvenci (LFSM-U)	SMe02U.pscx SMe02IBG.pscx SMe02SG.pscx
11.1.3	Simulace odezvy ve frekvenčně závislém režimu (FSM)	SMe03U.pscx SMe03IBG.pscx SMe03SG.pscx
11.1.4	Simulace schopnosti překlenout poruchu (FRT)	SMe04U.pscx SMe04IBG.pscx SMe04SG.pscx
11.1.5	Simulace obnovení činného výkonu po poruše (Post Fault Active Power Recovery)	SMe04U.pscx SMe04IBG.pscx SMe04SG.pscx
11.1.6	Simulace ostrovního provozu (Island Operation)	SMe06U.pscx SMe06IBG.pscx SMe06SG.pscx
11.1.7	Simulace schopnosti dodávat jalový výkon (Reactive Power Capability)	SMe07U.pscx SMe07IBG.pscx SMe07SG.pscx
11.1.8	Simulace dodávky rychlého poruchového proudu (Fast Fault Current)	SMe08U.pscx SMe08IBG.pscx SMe08SG.pscx
11.1.9	Simulace schopnosti zajišťovat umělou setrvačnost (Synthetic Inertia)	SMe09U.pscx SMe09IBG.pscx SMe09SG.pscx
11.2.1	PQU charakteristiky	SPQU.pscx
11.2.2	MAS + OP + ochrany	SMAS.pscx
11.3.1	Harmonické vs. krok výpočtu	B01.pscx
11.3.2	Určení frekvence v simulačním prostředí	B02.pscx

11.1 Simulace souladu pro VM

Následující podkapitoly se vztahují k popisu provedených simulací, které byly prováděny souladu s [50] (Metodika ověření souladu s požadavky RfG pro výrobní moduly typu C a D, 2.fáze: Simulace souladu pro synchronní a nesynchronní výrobní moduly). V rámci dané metodiky existuje požadavek na injektáž požadovaného signálu napětí nebo frekvence na vstup do regulátoru. Pro tyto účely byl použit *modul měření*, který je uzpůsoben právě těmto požadavkům. Jeho popis je uveden v kapitole 10.1.5.

Popis nastavení uvádí pouze informace nejbližší relevantní dané problematice/funkci. Nastavení všech ostatních parametrů lze nelézt vždy v konkrétní příloze této práce. Text podkapitol kapitoly 11.1 je z velké části citován z [50]. Dále jsou v těchto podkapitolách z důvodu přehlednosti uvedeny výstupy simulací pouze pro model napěťového zdroje. Ostatní výstupy lze získat pomocí simulací, které jsou příslušnými přílohami této práce. Pro simulace byly použity zdroje s výkonem řádově desítek kW připojených do nn sítě. Jedná se o poměrové snížení výkonů a napětí oproti VM typu C a D, které nemají vliv na samotné ověření funkce modelu. Nižších výkonů a napěťových hladin bylo zvoleno z důvodu rychlejší inicializace, přifázování a najetí zdrojů – pro urychlení simulačního procesu.

11.1.1 Simulace odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci (LFSM-O)

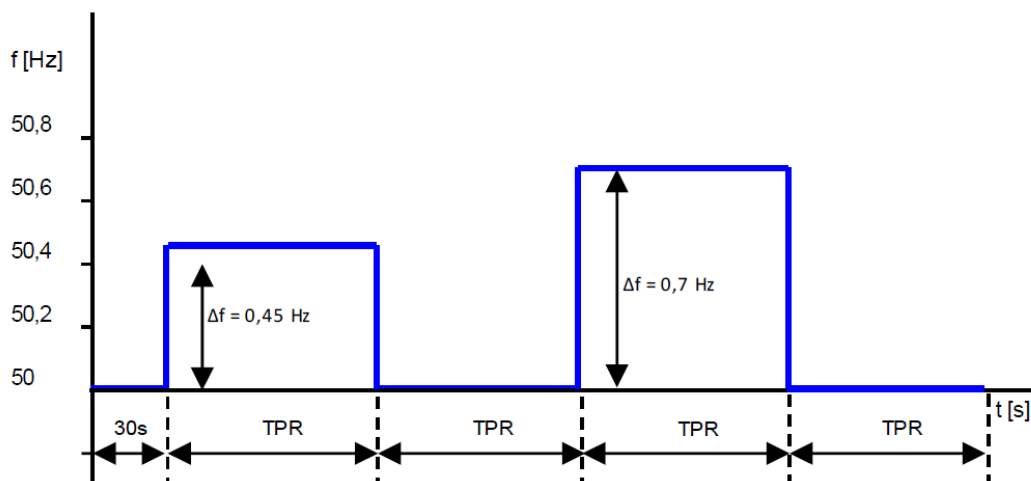
Projekty pro simulace: SMe01U.pscx, SMe01IBG.pscx a SMe01SG.pscx.

Simulace byly sestaveny podle požadavků metodiky ověření souladu s požadavky RfG pro výrobní moduly typu C a D [50]. Cíle simulace jsou uvedeny v kapitole Simulace odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci (LFSM-O), která je součástí kapitoly 3.1.5, strana 81.

Výchozí stav simulace je dodávka maximálního činného výkonu VM do sítě, napětí v místě připojení VM odpovídá nominální hodnotě, statika S_2 je 5 % a frekvenčně závislý režim při nadfrekvenci je samozřejmě zapnutý s nastavenou prahovou hodnotou frekvence 50,2 Hz.

Sledované veličiny jsou skutečný činný výkon VM (P_{skut}) a simulovaná frekvence na vstupu do regulátoru (f). Zaznamenává se jejich časový průběh během změn frekvence.

V **testu 1** je sledována **odezva na skokové změny frekvence** definované na obr. 11-1. Časová prodleva TPR má být dle metodiky volena v intervalu 1 až 5 min, s ohledem na ustálení činného výkonu VM po změně frekvence. Dané skokové změny frekvence, spolu s nastavenou statikou a prahovou hodnotou dávají požadavek na pokles činného výkonu o 10 a 20 % P_{max} . Test 1 se skládá ze dvou simulací. První, označena jako **test 1/1**, je prováděna z výkonu VM odpovídajícímu maximálnímu výkonu zdroje. Druhá simulace, označena jako **test 1/2**, je prováděna z takové hodnoty činného výkonu VM, při které by mělo při druhé skokové změně od nominální hodnoty frekvence dojít k poklesu žádaného výkonu pod minimální činný výkon VM. Další podmínkou testu je, že nesmí dojít k omezení žádaného výkonu VM zapůsobením omezovačů.



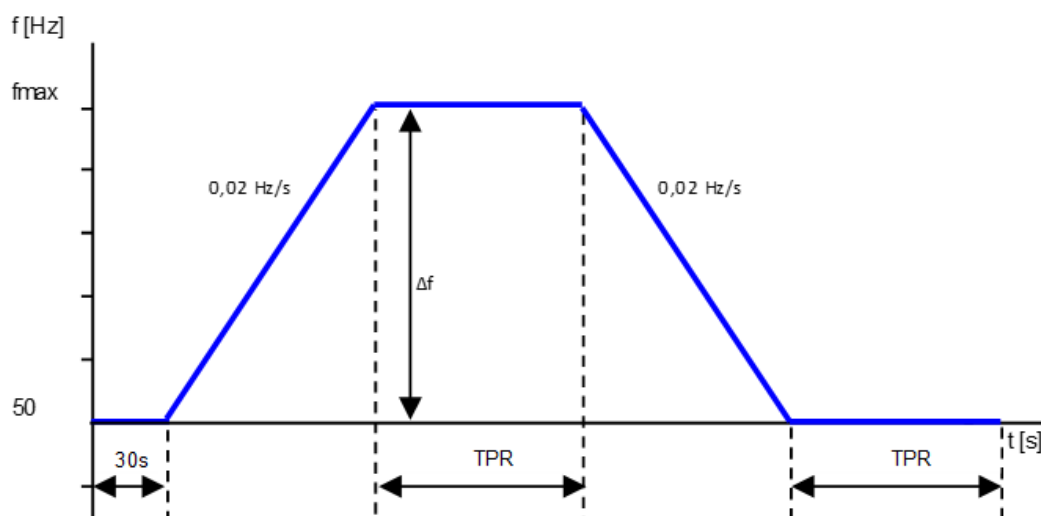
obr. 11-1 Časový průběh simulovaných skokových změn frekvence pro LFSM-O [50]

Vyhodnocení je řešeno kontrolou splnění **kritérií** pro splnění požadavků RfG na odezvu VM v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci [50]:

- Počáteční prodleva (zpoždění) v časovém průběhu odezvy činného výkonu P_{skut} na skokovou změnu frekvence musí být co nejkratší $\Delta t_{lim} \leq 2$ s. Pokud je tato prodleva delší než 2 s, musí být zdůvodněna.
- Odezva činného výkonu P_{skut} na skokové změny frekvence nesmí mít kmitavý průběh, tj. nesmí docházet k netlumeným oscilacím P_{skut} . Kmitavým průběhem jsou netlumené kmity o velikosti amplitudy větší než 5 % P_{max} nebo více než 4 tlumené kmity, kdy 4. amplituda je větší než 5 % P_{max} .
- Odezva činného výkonu P_{skut} musí odpovídat velikosti změny frekvence (přes přepočtení změny frekvence na změnu výkonu) s tolerancí ± 5 % P_{max} . V těchto tolerančních mezích očekávané odezvy P_{set} se musí po ustálení nacházet průběh P_{skut} .
- Odpovídající velikosti odezvy činného výkonu na kladnou skokovou změnu frekvence musí být pro SVM dosaženo snížení výkonu v čase $\Delta t_{resp} \leq 10$ s, pro NVM $\Delta t_{resp} \leq 4$ s. Jedná se o čas dosažení tolerančních mezí očekávané odezvy pro změnu výkonu $\Delta P \leq 20$ % P_{max} , který zahrnuje dovolenou počáteční prodlevu Δt_{lim} .
- Ustálení odezvy činného výkonu na kladnou skokovou změnu frekvence musí být pro SVM dosaženo v čase $\Delta t_u \leq 30$ s, pro NVM $\Delta t_u \leq 20$ s. Jedná se o čas ustálení odezvy činného výkonu v tolerančních mezích očekávané odezvy pro změnu výkonu $\Delta P \leq 20$ % P_{max} , který zahrnuje dovolenou počáteční prodlevu Δt_{lim} .
- Odpovídající velikosti odezvy činného výkonu na zápornou skokovou změnu frekvence musí být pro SVM dosaženo zvýšení výkonu v čase $\Delta t_{resp} \leq 5$ min. pro změnu výkonu $\Delta P \leq 20$ % P_{max} , pro NVM $\Delta t_{resp} \leq 12$ s pro změnu výkonu $\Delta P \leq 20$ % P_{max} . Jedná se o čas dosažení tolerančních mezí očekávané odezvy, který zahrnuje dovolenou počáteční prodlevu Δt_{lim} .
- Ustálení odezvy činného výkonu na zápornou skokovou změnu frekvence musí být pro SVM dosaženo v čase $\Delta t_u \leq 6$ min., pro NVM $\Delta t_u \leq 30$ s. Jedná se o čas ustálení odezvy činného výkonu v tolerančních mezích očekávané odezvy pro změnu výkonu $\Delta P \leq 20$ % P_{max} , který zahrnuje dovolenou počáteční prodlevu Δt_{lim} .

Body d) až g) nejsou určující pro celkové splnění požadavků testu. Ověřují se pouze současně dané očekávané časy odezvy VM na skokové změny frekvence (dle doporučení ENTSO).

V **testu 2** je sledována **odezva na postupnou změnu frekvence** definovanou na obr. 11-2. Trend nárůstu a poklesu frekvence je 0,02 Hz/s. Hodnota f_{\max} je velikost frekvence, která odpovídá dosažení spodní hranice provozního regulačního pásma výrobního modulu P_{\min} . V případě, že VM nedosáhne P_{\min} při hodnotě frekvence 51,5 Hz, provede se další test z takové výchozí hladiny výkonu, ze které bude dosaženo P_{\min} při frekvenci 51,5 Hz. Během simulace opět nesmí dojít k omezení P_{skut} zapůsobením omezovacích regulací. Test 2 se skládá ze dvou simulací. V simulaci **test 2/1** je výchozím výkonem maximální výkon zdroje. Při frekvenci 51,5 Hz tak nebude dosaženo minimálního výkonu zdroje. Proto je v simulaci **test 2/2** snížena hodnota aktuálního činného výkonu na hodnotu, ze které k dosažení minimálního výkonu dojde před dosažením frekvence 51,5 Hz, což na vzdory popisu v metodice dává smysl, neboť je takto skutečně ověřena správná funkce omezení činného výkonu při dosažení minimálního výkonu v kombinaci s funkcí odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci.



obr. 11-2: Časový průběh simulované plynulé změny frekvence pro LFSM-O [50]

Dalšími **kritérii** pro splnění požadavků RfG na odezvu VM v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci jsou [50]:

- h) Z časového průběhu činného výkonu P_{skut} se ověří velikost pásma necitlivosti na vzestupnou změnu frekvence. Činný výkon se musí začít měnit odpovídajícím způsobem nejpozději do 2 s po překročení mezní frekvence 50,2 Hz. Pokud je tato prodleva $\Delta t_{\text{lim}} > 2$ s, musí být zdůvodněna.
- i) Z průběhu změny frekvence f a odpovídající změny P_{skut} se pro oba směry změny vypočte statika, která se nesmí lišit od nastavené hodnoty statiky o více než ± 15 %. Ze získaných bodů se pomocí lineární regrese (metodou nejmenších čtverců) proloží regresní přímka a ze směrnice této přímky se vypočte statika.
- j) Po dosažení minimální regulační úrovně P_{\min} musí výrobní modul být schopný pokračovat v provozu na této úrovni výkonu minimálně po dobu TPR.

Popis simulací

Nominální výkon všech modelů zdrojů byl zvolen 25 kW při nominálním napětí v místě připojení 0,4 kV. Zdroje pracují s účínkem 1, s deaktivovaným blokem ochrany a deaktivovanými výkonovými křivkami.

Metodika neřeší nastavení meze deaktivace, což je opodstatnitelné vzhledem k účelu testu. Mez deaktivace funkce proto byla nastavena na 50,2 Hz. Časová odezva při skokové změně frekvence by měla být co nejkratší, proto byla nastavena na hodnotu 0 s. Podobně, časová prodleva po podkročení meze deaktivace byla taktéž nastavena na 0 s. Časová konstanta funkce byla zvolena 0,01 s. Další atribut, který není metodikou řešen je velikost rampy maximální změny požadovaného výkonu, což je opodstatnitelné z důvodu účelu testu – prokázat rychlost a správnost změny výkonu VM. V simulacích byla zvolena rampa 100 kW pro nárůst výkonu, což je dostatečná hodnota k tomu, a nedošlo k ovlivnění regulace činného výkonu po návratu frekvence zpět na hodnotu 50 Hz. Možnosti nastavení testované funkce v modulu řízení nejsou v rámci simulací podle metodiky plně využity.

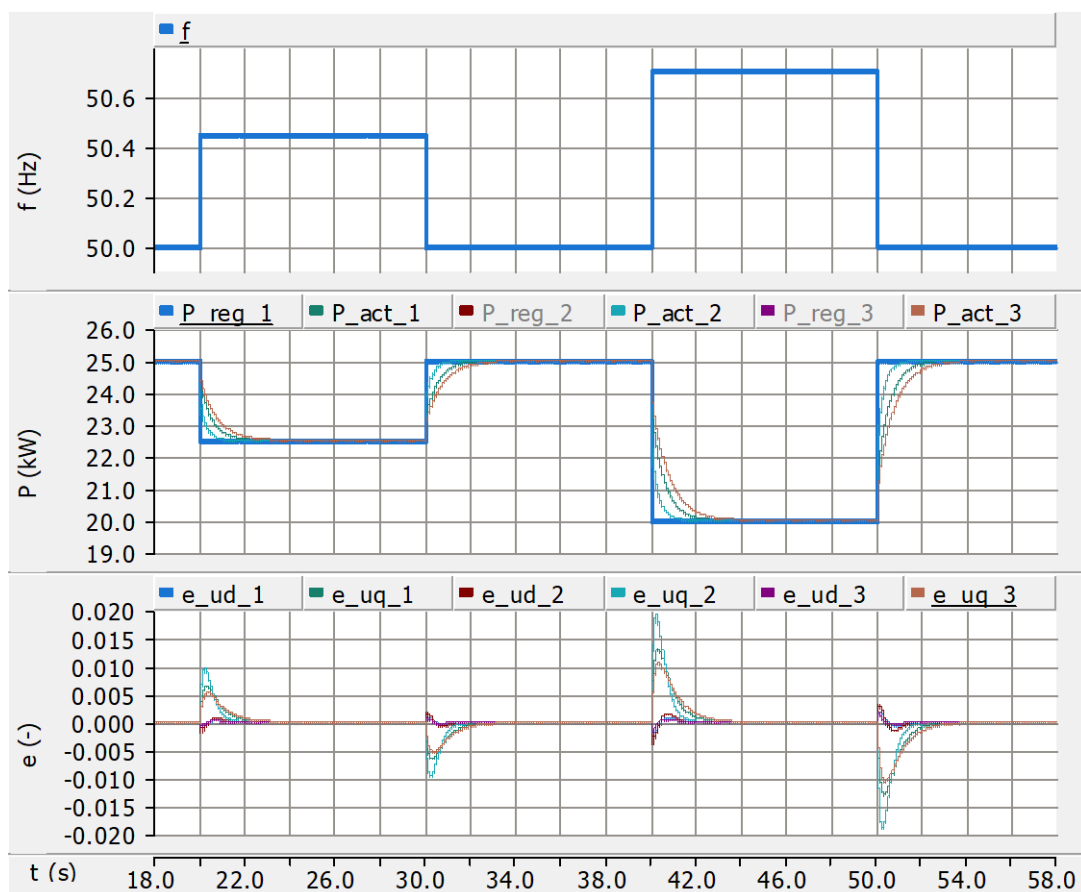
Test 1/1 začíná z nominální hodnoty výkonu zdroje – 25 kW. Pro **test 1/2** byla nastavena minimální hodnota výkonu VM na 8 kW. Výchozí výkon VM na začátku testu 1/2 tak musí být v rozmezí 10,5 až 13,0 kW (1. skok odpovídá požadavku na pokles výkonu o 10 % z nominální hodnoty výkonu zdroje (při dané statické 5 %), což je 2,5 kW. 2. skok o 20 %, což je 5 kW). Zvolená hodnota výchozího výkonu byla 11 kW. Počáteční prodleva (dle metodiky 30 s) byla zkrácena na 20 s, což je dostatečná doba pro najetí a ustálení zdrojů v rámci zvolených nastavení. Časová prodleva byla u testu 1/1 zvolena 10 s, což je opět dostatečná doba pro ustálení výkonu zdrojů v rámci zvolených nastavení. **Test 2/1** začíná z nominální hodnoty výkonu zdroje – 25 kW. **Test 2/2** začíná z hodnoty 16 kW. Dosažení minimální hodnoty výkonu zdroje tak dojde podle funkce zkoumaného režimu při frekvenci 51,45 Hz.

Funkce závislosti velikosti činného výkonu při nadfrekvenci v místě připojení (v síti) má přesně definovanou charakteristiku. Jejím uplatněním tak vzniká požadavek na velikost činného výkonu, který vstupuje na samotný regulátor výkonu zdroje. To, jestli a jak dojde k uplatnění požadavku na velikost činného výkonu zdroje pak závisí právě na konstrukci a nastavení regulátoru a uplatnění výstupu regulátoru v silové návaznosti. Silová návaznost v simulačním prostředí je opět matematický popis funkce reálných systémů. Tato silová návaznost je reprezentována přímo napětovým zdrojem u modelu s napětovým zdrojem, resp. střídačem u IBG modelu, resp. synchronním generátorem u SG modelu VM. Všechny tyto silové návaznosti jsou v modelech umístěny v modulu samotného zdroje (U, IBG, SG). Pro kompletní analýzu modelu je tak možné řešit, zkoumat a hodnotit různé elementy a návaznosti tohoto řetězce při různých nastaveních jednotlivých částí daného řetězce. Požadavkem metodiky je hodnotit pouze výstupní činný výkon zdroje a frekvenci vnucenou zdroji. V následujících podkapitole je mimo to řešeno ještě různé nastavení regulátoru, které je ve výsledku hodnoceno na základě průběhu regulační odchylky. Nastavení regulačních obvodů VM totiž do značné míry určuje celkové chování VM. Popis konkrétního nastavení regulátoru VM není v tomto dokumentu přímo uvedeno. Konkrétní nastavení lze nalézt přímo v souboru simulace dané zkoušky, v rámci příloh této práce, které jsou vždy uvedeny u příslušného setu simulací.

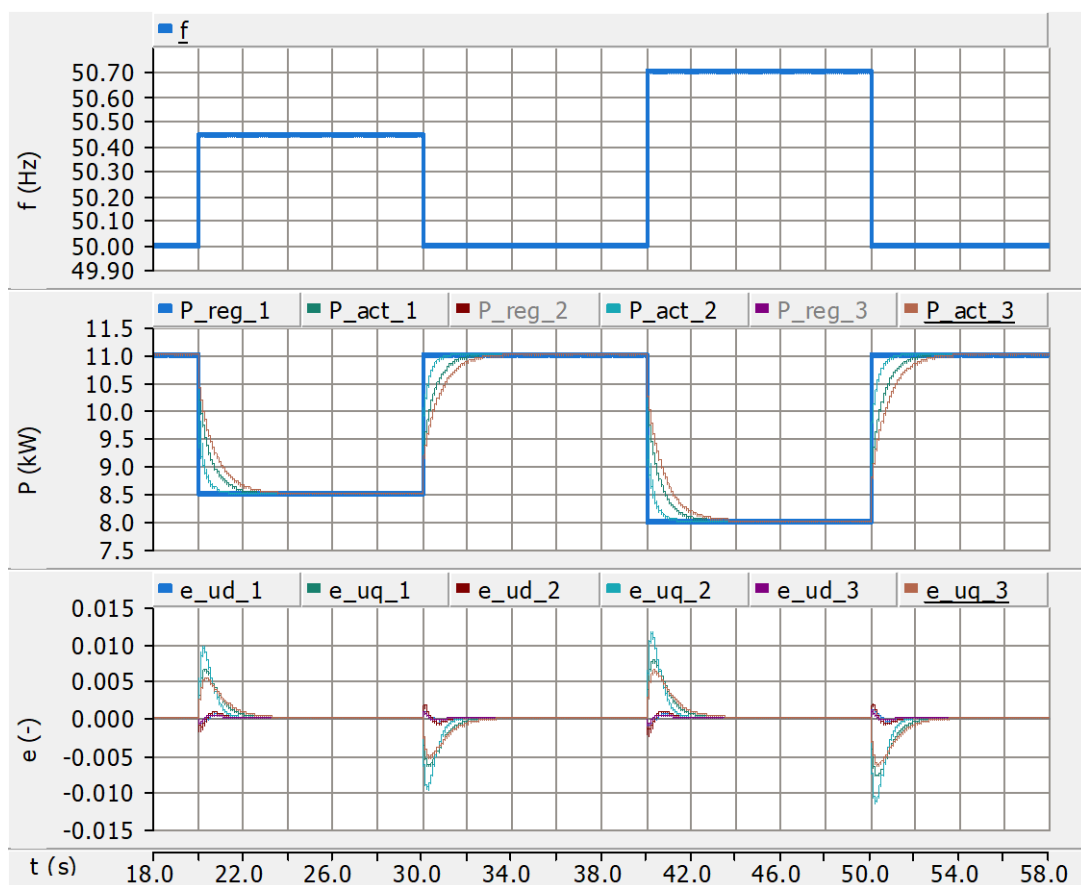
Provedení simulací

Simulace byly provedeny pro tři různá nastavení parametrů regulačního obvodu. Konkrétní nastavení lze dohledat přímo v nastavení modelů VM v souboru SME01U.pscx a konkrétní simulace lze revidovat změnou stavu vrstvy a přepínače vztahující se ke konkrétnímu testu. Grafy na obr. 11-3 až obr. 11-6 znázorňují průběhy sledovaných veličin pro testy 1/1, 1/2, 2/1 a 2/2.

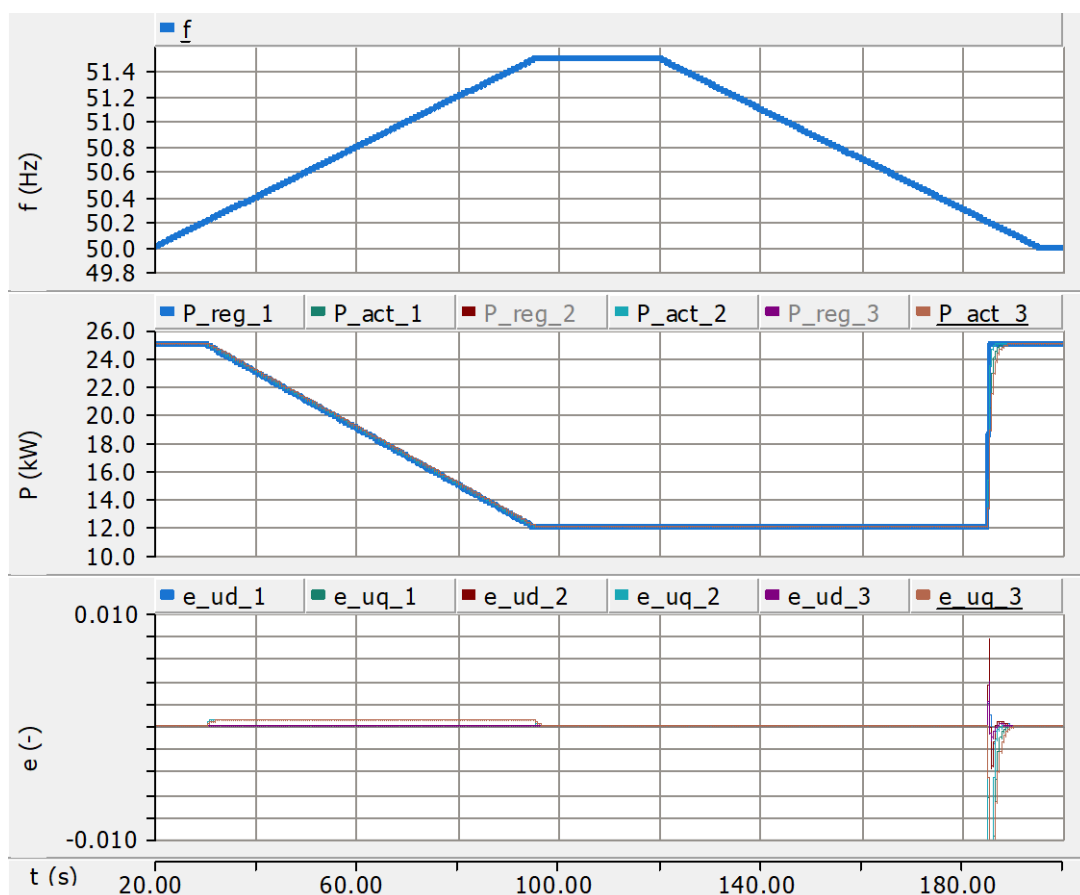
Všechny simulované průběhy splňují kritéria simulace odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci.



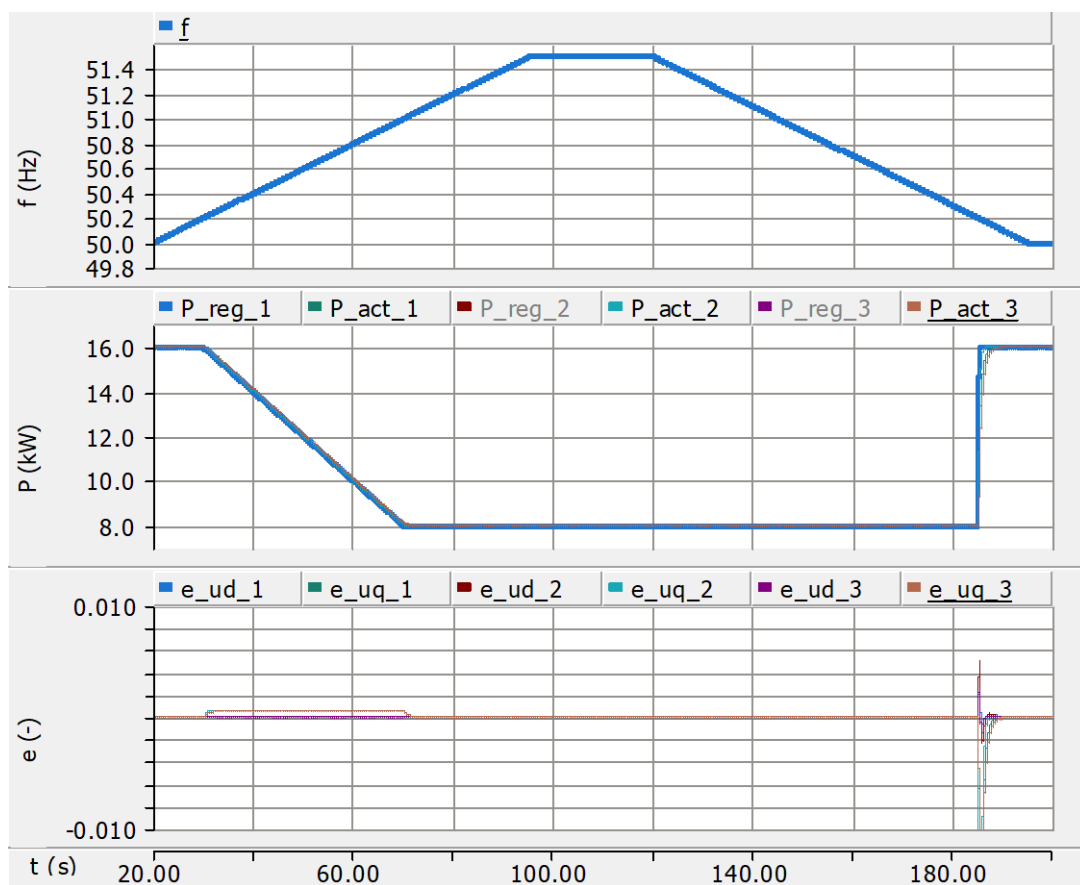
obr. 11-3: SMe01U – test 1/1



obr. 11-4: SMe01U – test 1/2



obr. 11-5: SMe01U – test 2/1



obr. 11-6: SMe01U – test 2/2

11.1.2 Simulace odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při podfrekvenci (LFSM-U)

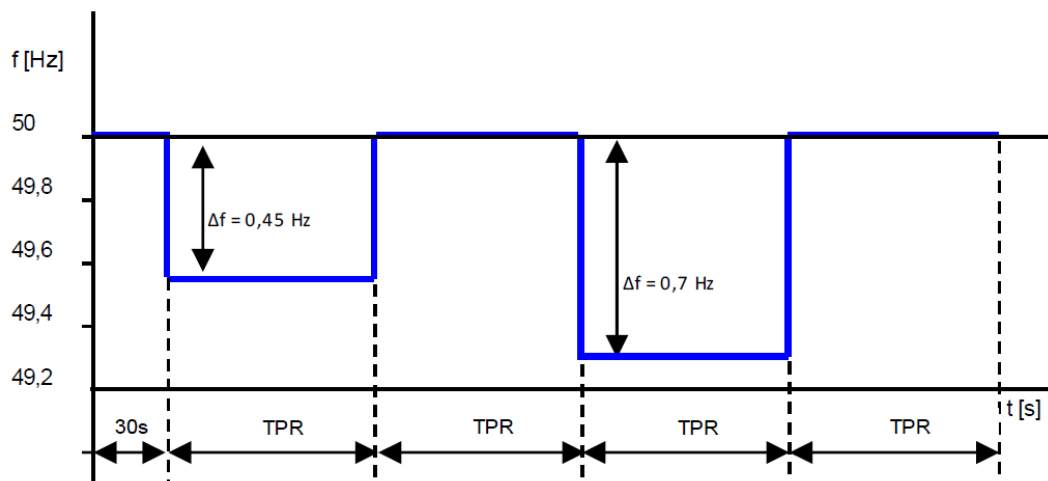
Projekty pro simulace: SMe02U.pscx, SMe02IBG.pscx a SMe02SG.pscx.

Simulace byly sestaveny podle požadavků metodiky ověření souladu s požadavky RfG pro výrobní moduly typu C a D [50]. Cíle simulace jsou uvedeny v kapitole Simulace odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při podfrekvenci (LFSM-U), která je součástí kapitoly 3.1.5.

Výchozí stav simulace je dodávka minimálního činného výkonu VM do sítě, napětí v místě připojení VM odpovídá nominální hodnotě, statika S_2 je 5 % a frekvenčně závislý režim při podfrekvenci je samozřejmě zapnutý s nastavenou prahovou hodnotou frekvence 49,8 Hz.

Sledované veličiny jsou skutečný činný výkon VM (P_{skut}) a simulovaná frekvence na vstupu do regulátoru (f). Zaznamenává se jejich časový průběh během změn frekvence.

V **testu 1** je sledována **odezva na skokové změny frekvence** definované na obr. 11-7. Časová prodleva TPR má být dle metodiky volena v intervalu 1 až 5 min, s ohledem na ustálení činného výkonu VM po změně frekvence. Dané skokové změny frekvence, spolu s nastavenou statikou a prahovou hodnotou dávají požadavek na pokles činného výkonu o 10 a 20 % P_{max} . Test 1 se skládá ze dvou simulací. První, označena jako **test 1/1**, je prováděna z výkonu VM odpovídajícímu minimálnímu výkonu zdroje. Druhá simulace, označena jako **test 1/2**, je prováděna z takové hodnoty činného výkonu VM, při které by mělo při druhé skokové změně od nominální hodnoty frekvence dojít k nárůstu žádaného výkonu nad maximální činný výkon VM. Další podmínkou testu je, že nesmí dojít k omezení žádaného výkonu VM zapůsobením omezovačů.



obr. 11-7: Časový průběh simulovaných skokových změn frekvence pro LFSM-U [50]

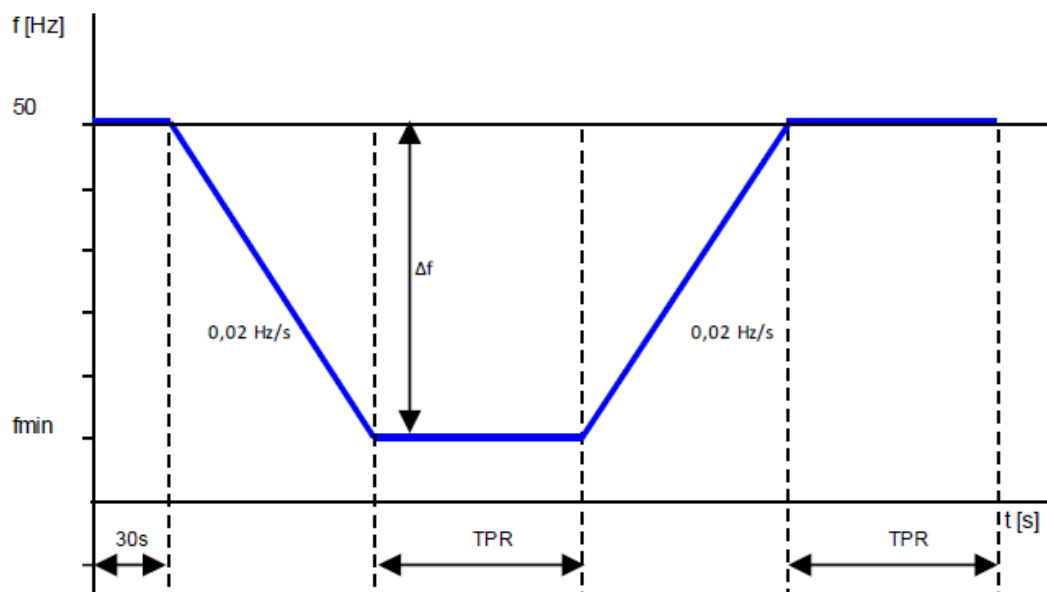
Vyhodnocení je řešeno kontrolou splnění **kritérií** pro splnění požadavků RfG na odezvu VM v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci [50]:

- Počáteční prodleva (zpoždění) v časovém průběhu odezvy činného výkonu P_{skut} na skokovou změnu frekvence musí být co nejkratší $\Delta t_{lim} \leq 2$ s. Pokud je tato prodleva delší než 2 s, musí být zdůvodněna.
- Odezva činného výkonu P_{skut} na skokové změny frekvence nesmí mít kmitavý průběh, tj. nesmí docházet k netlumeným oscilacím P_{skut} . Kmitavým průběhem jsou netlumené kmity o velikosti amplitudy větší než 5 % P_{max} nebo více než 4 tlumené kmity, kdy 4. amplituda je větší než 5 % P_{max} .

- c) Odezva činného výkonu P_{skut} musí odpovídat velikosti změny frekvence (přes přepočet změny frekvence na změnu výkonu) s tolerancí $\pm 5 \% P_{\text{max}}$. V těchto tolerančních mezích očekávané odezvy P_{set} se musí po ustálení nacházet průběh P_{skut} .
- d) Odpovídající velikosti odezvy činného výkonu na zápornou skokovou změnu frekvence musí být pro SVM dosaženo snížení výkonu v čase $\Delta t_{\text{resp}} \leq 5 \text{ min.}$ pro změnu výkonu $\Delta P \leq 20 \% P_{\text{max}}$, pro NVM $\Delta t_{\text{resp}} \leq 12 \text{ s}$ pro změnu výkonu $\Delta P \leq 20 \% P_{\text{max}}$. Jedná se o čas dosažení tolerančních mezí očekávané odezvy pro změnu výkonu $\Delta P \leq 20 \% P_{\text{max}}$, který zahrnuje dovolenou počáteční prodlevu Δt_{lim} .
- e) Ustálení odezvy činného výkonu na zápornou skokovou změnu frekvence musí být pro SVM dosaženo v čase $\Delta t_u \leq 6 \text{ min.}$ pro NVM $\Delta t_u \leq 30 \text{ s}$. Jedná se o čas ustálení odezvy činného výkonu v tolerančních mezích očekávané odezvy pro změnu výkonu $\Delta P \leq 20 \% P_{\text{max}}$, který zahrnuje dovolenou počáteční prodlevu Δt_{lim} .
- f) Odpovídající velikosti odezvy činného výkonu na kladnou skokovou změnu frekvence musí být pro SVM dosaženo snížení výkonu v čase $\Delta t_{\text{resp}} \leq 10 \text{ s}$, pro NVM $\Delta t_{\text{resp}} \leq 4 \text{ s}$. Jedná se o čas dosažení tolerančních mezí očekávané odezvy, který zahrnuje dovolenou počáteční prodlevu Δt_{lim} .
- g) Ustálení odezvy činného výkonu na kladnou skokovou změnu frekvence musí být pro SVM dosaženo v čase $\Delta t_u \leq 30 \text{ s}$, pro NVM $\Delta t_u \leq 20 \text{ s}$. Jedná se o čas ustálení odezvy činného výkonu v tolerančních mezích očekávané odezvy pro změnu výkonu $\Delta P \leq 20 \% P_{\text{max}}$, který zahrnuje dovolenou počáteční prodlevu Δt_{lim} .

Body d) až g) nejsou určující pro celkové splnění požadavků testu. Ověřují se pouze současně dané očekávané časy odezvy VM na skokové změny frekvence (dle doporučení ENTSO).

V **testu 2** je sledována **odezva na postupnou změnu frekvence** definovanou obr. 11-8. Trend poklesu a nárůstu frekvence je $0,02 \text{ Hz/s.}$ Hodnota f_{min} je velikost frekvence, která odpovídá dosažení horní hranice provozního regulačního pásma výrobního modulu P_{max} . V případě, že VM nedosáhne P_{max} při hodnotě frekvence $48,5 \text{ Hz}$, provede se další test z takové výchozí hladiny výkonu, ze které bude dosaženo P_{max} při frekvenci $48,5 \text{ Hz}$. Během simulace opět nesmí dojít k omezení P_{skut} zapůsobením omezovacích regulací. Test 2 se skládá ze dvou simulací. V simulaci **test 2/1** je výchozím výkonem minimální výkon zdroje. Při frekvenci $48,5 \text{ Hz}$ tak nebude dosaženo maximálního výkonu zdroje. Proto je v simulaci **test 2/2** zvýšena hodnota aktuálního činného výkonu na hodnotu, ze které k dosažení maximálního výkonu dojde před dosažením frekvence $48,5 \text{ Hz}$, což na vzdory popisu v metodice dává smysl, neboť je takto skutečně ověřena správná funkce omezení činného výkonu při dosažení maximálního výkonu v kombinaci s funkcí odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při podfrekvenci.



obr. 11-8: Časový průběh simulované plynulé změny frekvence pro LFSM-U [50]

Dalšími **kritérii** pro splnění požadavků RfG na odezvu VM v omezeném frekvenčně závislém režimu při podfrekvenci jsou [50]:

- h) Z časového průběhu činného výkonu P_{skut} se ověří velikost pásma necitlivosti na vzestupnou změnu frekvence. Činný výkon se musí začít měnit odpovídajícím způsobem nejpozději do 2 s po překročení mezní frekvence 49,8 Hz. Pokud je tato prodleva $\Delta t_{lim} > 2$ s, musí být zdůvodněna.
- i) Z průběhu změny frekvence f a odpovídající změny P_{skut} se pro oba směry změny vypočte statika, která se nesmí lišit od nastavené hodnoty statiky o více než ± 15 %. Ze získaných bodů se pomocí lineární regrese (metodou nejmenších čtverců) proloží regresní přímka a ze směrnice této přímky se vypočte statika.
- j) Po dosažení maximální regulační úrovně P_{max} musí výrobní modul být schopný pokračovat v provozu na této úrovni výkonu minimálně po dobu TPR.

Popis simulací

Nominální výkon všech modelů zdrojů byl zvolen 25 kW při nominálním napětí v místě připojení 0,4 kV. Zdroje pracují s účínkem 1, s deaktivovaným blokem ochrany a deaktivovanými výkonovými křivkami.

Metodika neřeší nastavení meze deaktivace, což je opodstatnitelné vzhledem k účelu testu. Mez deaktivace funkce proto byla nastavena na 49,8 Hz. Časová odezva při skokové změně frekvence by měla být co nejkratší, proto byla nastavena na hodnotu 0 s. Podobně, časová prodleva po překročení meze deaktivace byla taktéž nastavena na 0 s. Časová konstanta funkce byla zvolena 0,01 s. Další atribut, který není metodikou řešen je velikost rampy maximální změny požadovaného výkonu, což je opodstatnitelné z důvodu účelu testu – prokázat rychlost a správnost změny výkonu VM. V simulacích byla zvolena rampa 100 kW pro pokles výkonu, což je dostatečná hodnota k tomu, a nedošlo k ovlivnění regulace činného výkonu po návratu frekvence zpět na hodnotu 50 Hz. Možnosti nastavení testované funkce v modulu řízení nejsou v rámci simulací podle metodiky plně využity.

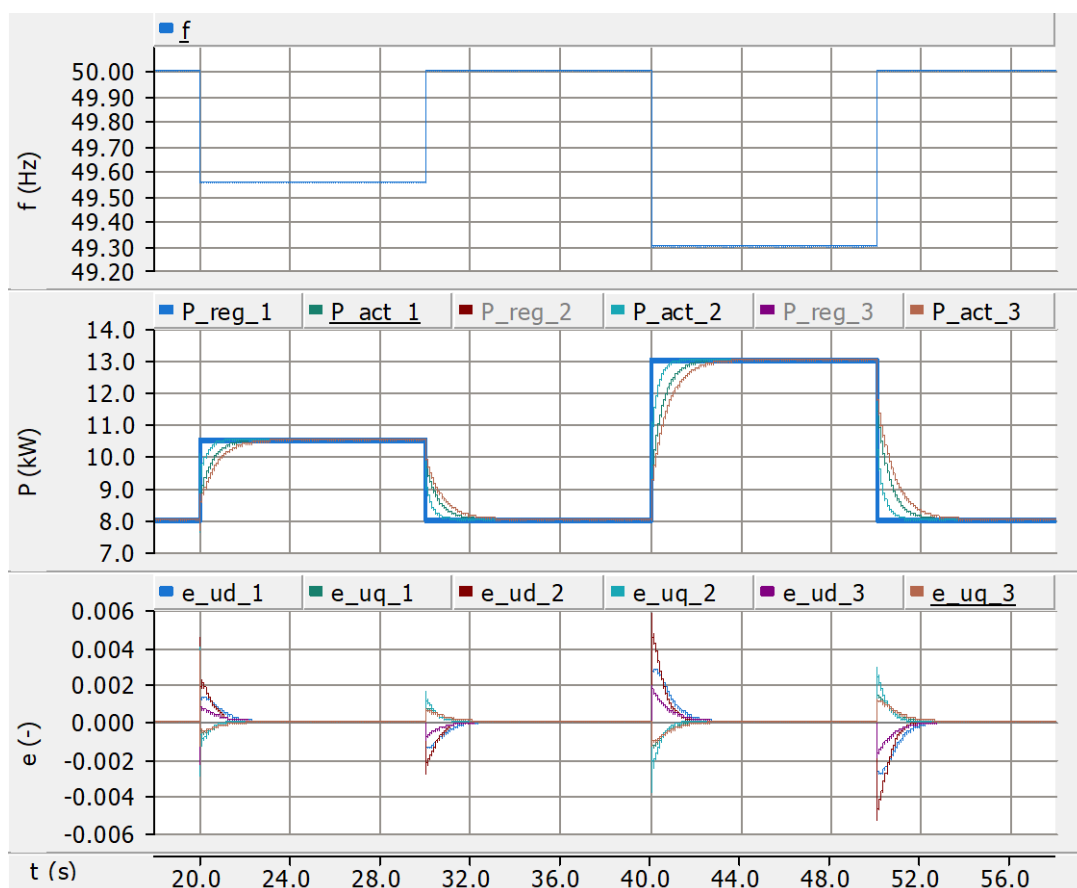
Test 1/1 začíná z minimální hodnoty výkonu zdroje – 8 kW. Výchozí výkon VM na začátku **testu 1/2** tak musí být v rozmezí 20,0 až 22,5 kW (1. skok odpovídá požadavku na nárůst výkonu o 10 % z nominální hodnoty výkonu zdroje (při dané statické 5 %), což je 2,5 kW. 2. skok o 20 %, což je 5 kW). Zvolená hodnota výchozího výkonu byla 20,5 kW. Počáteční prodleva (dle metodiky 30 s) byla zkrácena na 20 s, což je dostatečná doba pro najetí a ustálení zdrojů v rámci zvolených nastavení. Časová prodleva byla u testu 1/1 zvolena 10 s, což je opět dostatečná doba pro ustálení výkonu zdrojů v rámci zvolených nastavení. **Test 2/1** začíná z minimální hodnoty výkonu zdroje – 8 kW. **Test 2/2** začíná z hodnoty 12,5 kW. Dosažení maximální hodnoty výkonu zdroje tak dojde podle funkce zkoumaného režimu při frekvenci 48,55 Hz.

Funkce závislosti velikosti činného výkonu při podfrekvenci v místě připojení (v síti) má přesně definovanou charakteristiku. Jejím uplatněním tak vzniká požadavek na velikost činného výkonu, který vstupuje na samotný regulátor výkonu zdroje. To, jestli a jak dojde k uplatnění požadavku na velikost činného výkonu zdroje pak závisí právě na konstrukci a nastavení regulátoru a uplatnění výstupu regulátoru v silové návaznosti. Silová návaznost v simulačním prostředí je opět matematický popis funkce reálných systémů. Tato silová návaznost je reprezentována přímo napěťovým zdrojem u modelu s napěťovým zdrojem, resp. střídačem u IBG modelu, resp. synchronním generátorem u SG modelu VM. Všechny tyto silové návaznosti jsou v modelech umístěny v modulu samotného zdroje (U, SG, IBG). Pro kompletní analýzu modelu je tak možné řešit, zkoumat a hodnotit různé elementy a návaznosti tohoto řetězce při různých nastaveních jednotlivých částí daného řetězce. Požadavkem metodiky je hodnotit pouze výstupní činný výkon zdroje a frekvenci vnucenou zdroji. V následujících podkapitolách je mimo to řešeno ještě různé nastavení regulátoru, které je ve výsledku hodnoceno na základě průběhu regulační odchylky. Nastavení regulačních obvodů VM totiž do značné míry určuje celkové chování VM. Popis konkrétního nastavení regulátoru VM není v tomto dokumentu přímo uvedeno. Konkrétní nastavení lze nalézt přímo v souboru simulace dané zkoušky, v rámci příloh této práce, které jsou vždy uvedeny u příslušného setu simulací.

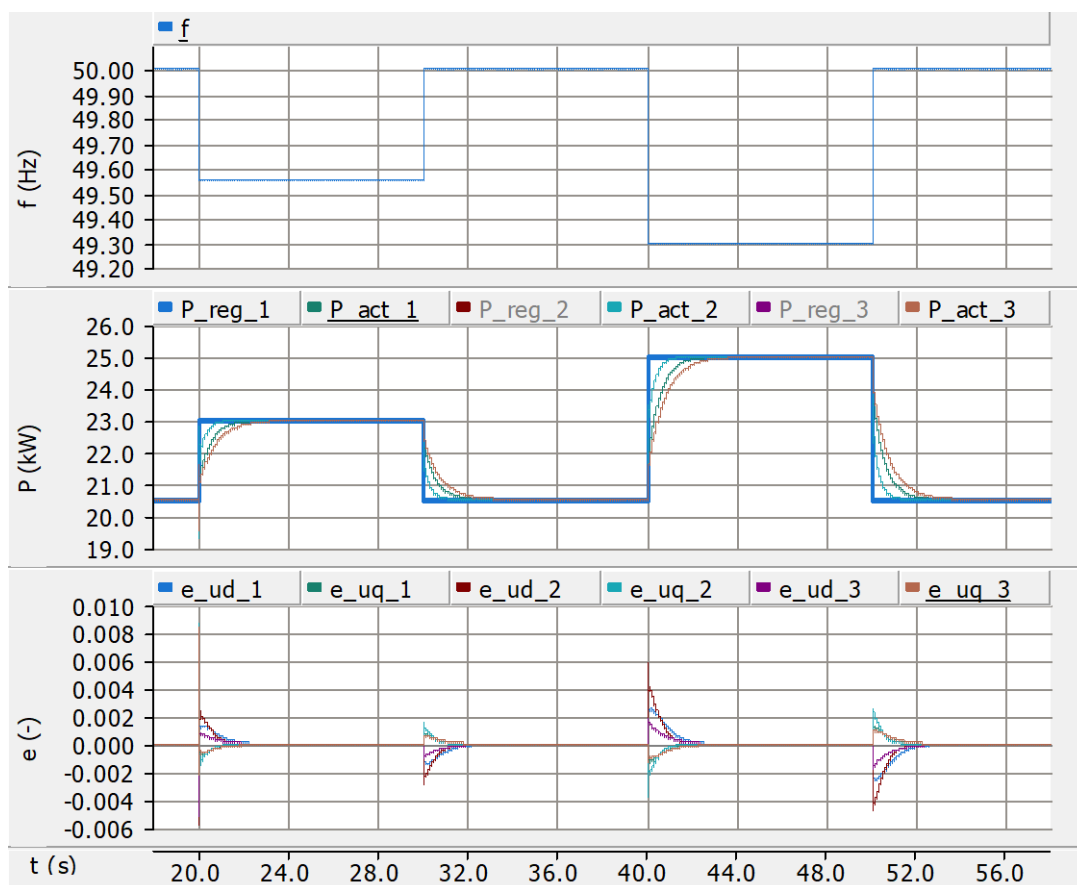
Provedení simulací

Simulace byly provedeny pro tři různá nastavení parametrů regulačního obvodu. Konkrétní nastavení lze dohledat přímo v nastavení modelů VM v souboru SMe02U.pscx a konkrétní simulace lze revidovat změnou stavu vrstvy a přepínače vztahující se ke konkrétnímu testu. Grafy na obr. 11-9 až obr. 11-12 znázorňují průběhy sledovaných veličin pro testy 1/1, 1/2, 2/1 a 2/2.

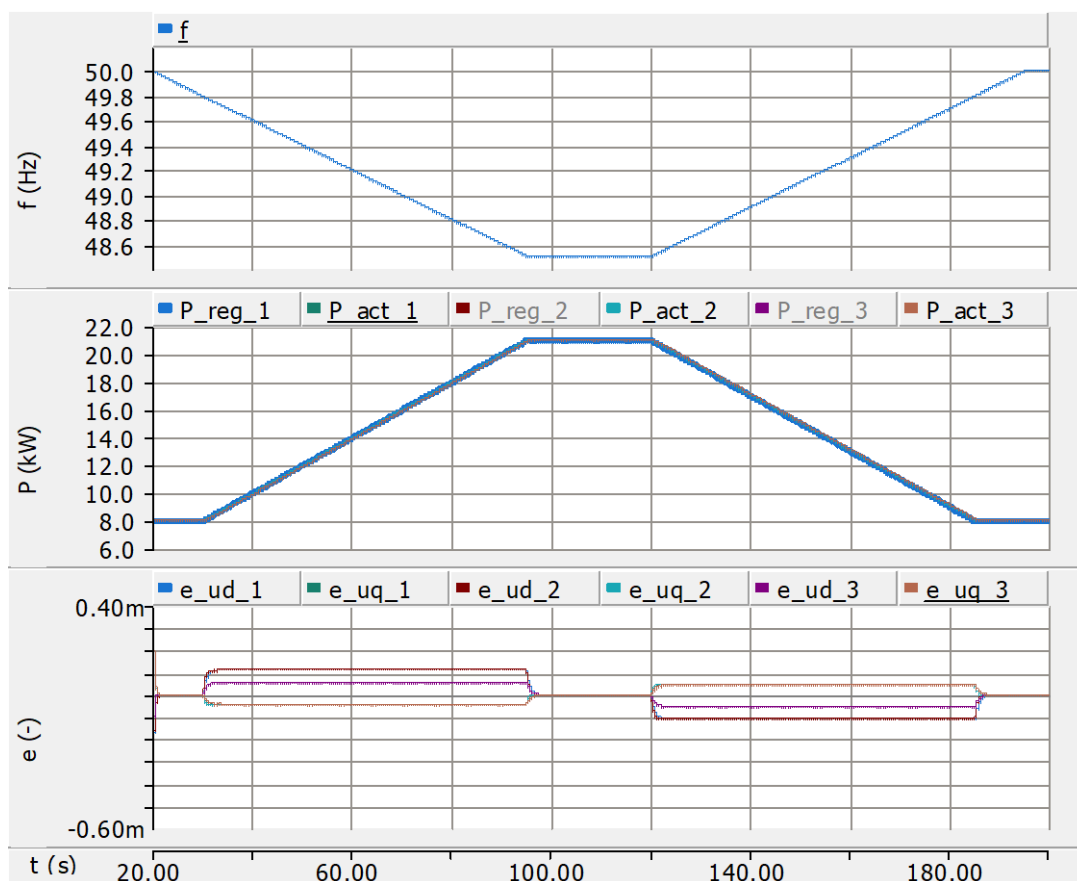
Všechny simulované průběhy splňují kritéria simulace odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při podfrekvenci.



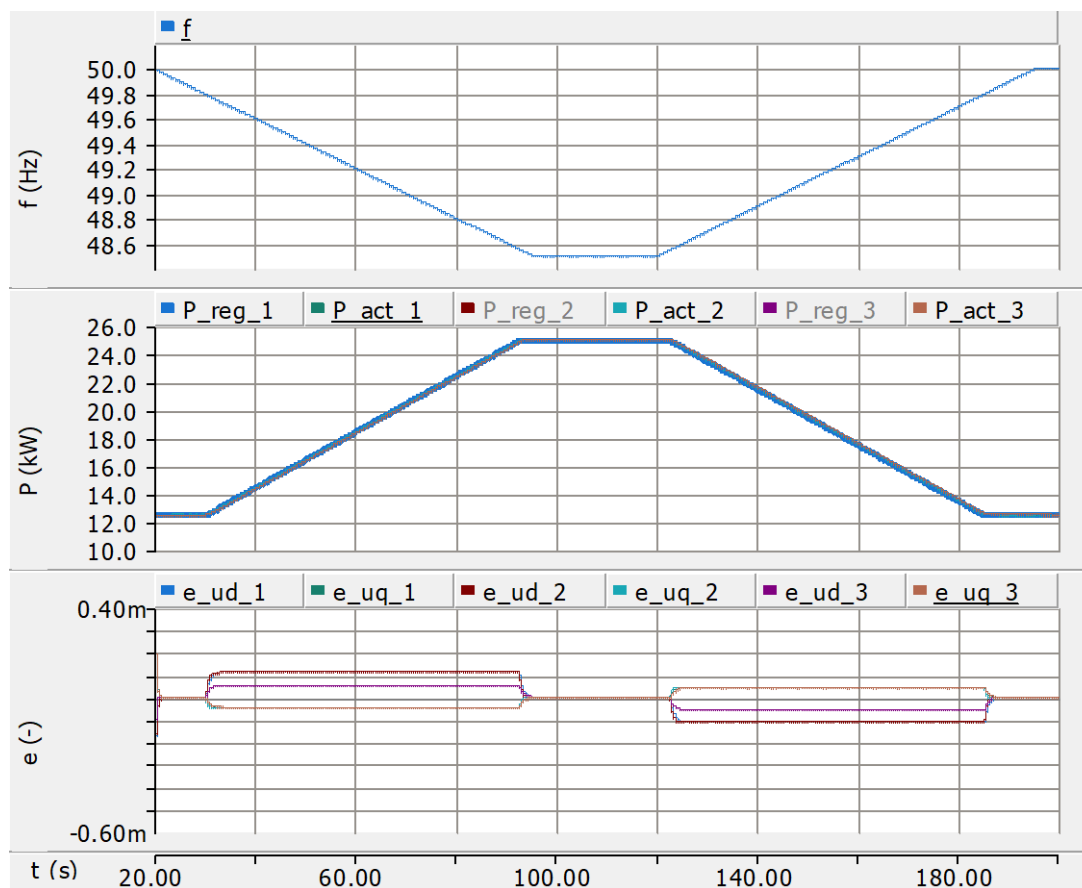
obr. 11-9: SMe02U – test 1/1



obr. 11-10: SMe02U – test 1/2



obr. 11-11: SMe02U – test 2/1



obr. 11-12: SMe02U – test 2/2

11.1.3 Simulace odezvy ve frekvenčně závislém režimu (FSM)

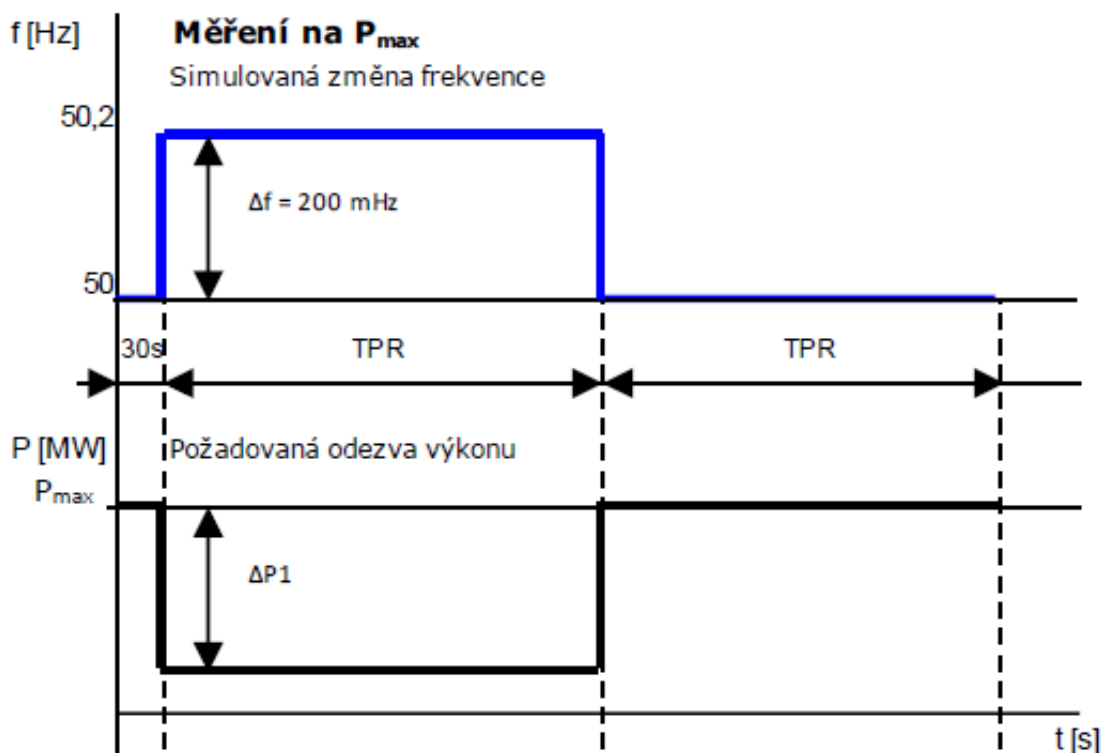
Projekty pro simulace: SMe03U.pscx, SMe03IBG.pscx a SMe03SG.pscx.

Simulace byly sestaveny podle požadavků metodiky ověření souladu s požadavky RfG pro výrobní moduly typu C a D [50]. Cíle simulace jsou uvedeny v kapitole Simulace odezvy ve frekvenčně závislém režimu (FSM), která je součástí kapitoly 3.1.5.

Výchozí stav simulace je dodávka minimálního, maximálního či jiného, dále uvedeného činného výkonu VM do sítě, napětí v místě připojení VM odpovídá nominální hodnotě, statika S_1 je nastavena dle maximální velikosti frekvenční odezvy činného výkonu $\Delta P_1/P_{\max}$, dle tab. 3-5 (strana 82). Frekvenčně závislý režim je zapnutý, s nastavenou prahovou hodnotou aktivace ± 200 mHz a pásmem necitlivosti frekvenční odezvy 0 mHz.

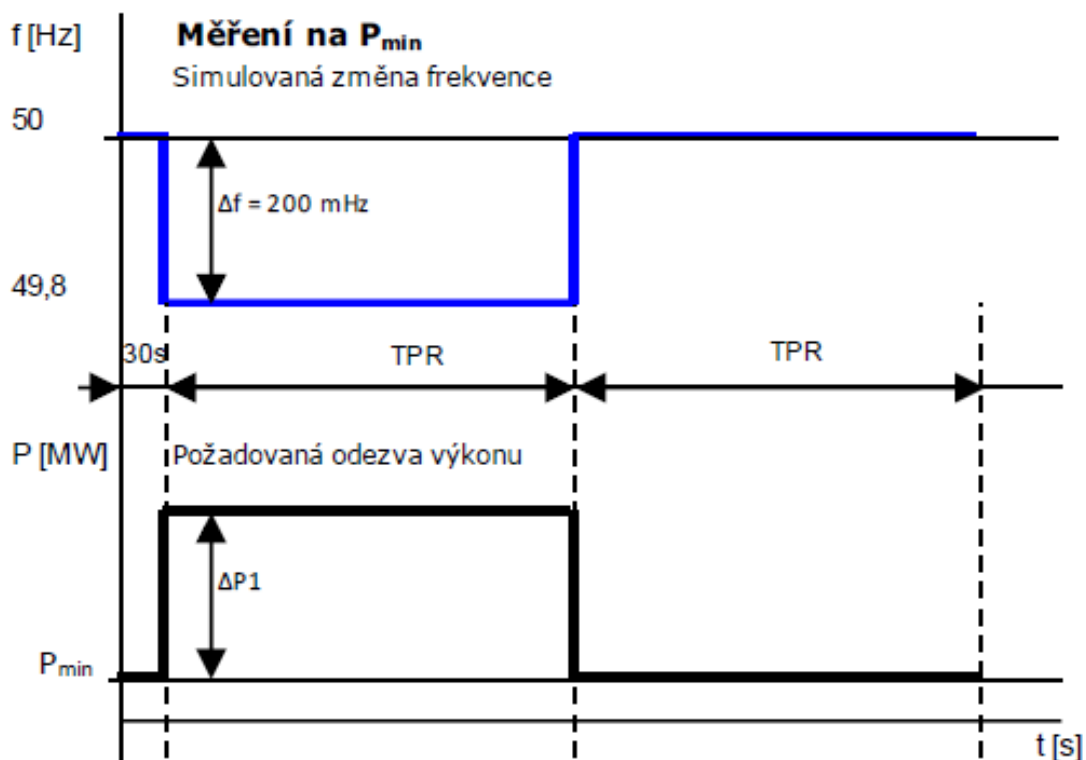
Sledované veličiny jsou skutečný činný výkon VM (P_{skut}) a simulovaná frekvence na vstupu do regulátoru (f). Zaznamenává se jejich časový průběh během změn frekvence.

V **testu 1** je sledována **odezva na skokové změny frekvence** funkce frekvenčně závislého režimu. V **testu 1/1** je sledována odezva na skokové změny frekvence dle obr. 11-13. Výchozí hladina výkonu VM je maximální činný výkon VM. Časová prodleva TPR by měla být minimálně 15 minut (pro parní zdroje), resp. 30 minut pro ostatní VM. Realizace několikaminutové časové prodlevy TPR v rámci simulací je vzhledem k rozsahu vlastností modelu zdroje zbytečná. Postulované modely, podobně jako jiné modely tvořené v simulačním prostředí, mají vlastnosti primární přeměny energie paliva realizované pouze nastavitelnou časovou konstantou, která reprezentuje odezvu regulátoru páry (u parních zdrojů) a nepostihuje tak možnost ověření schopnosti technologie řešit přechodné stavy v oblasti části technologie definované teplotnickými parametry. Jinými slovy – modely jsou primárně zaměřeny a simulace regulací elektrických parametrů a vlivu VM na síť a naopak.



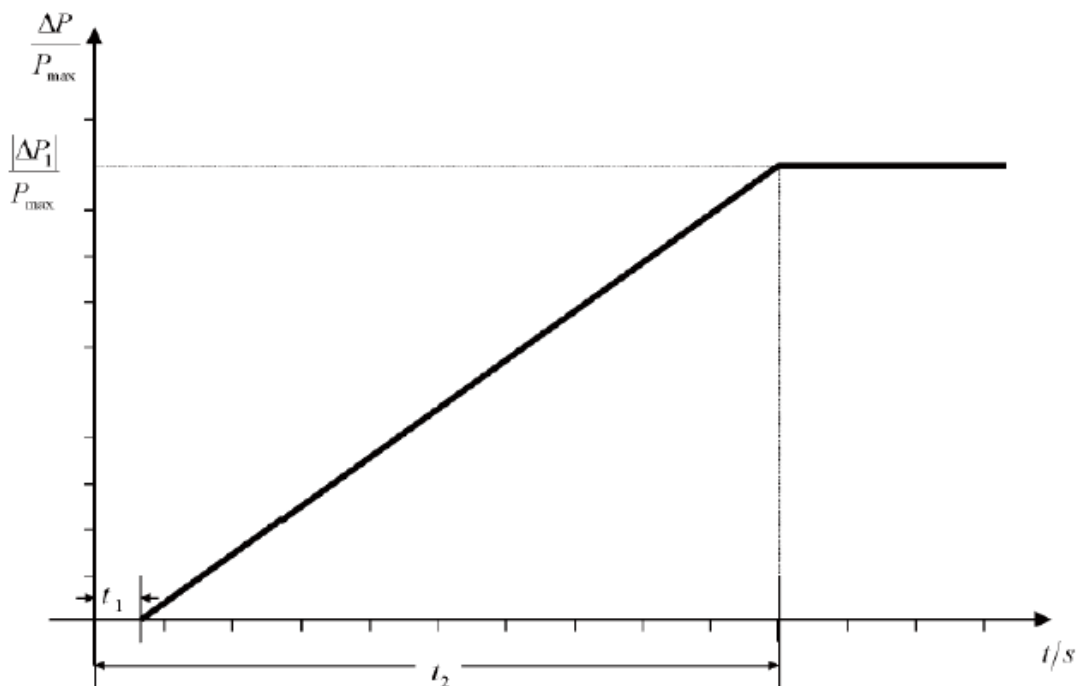
obr. 11-13: Časový průběh simulované skokové změny frekvence a požadované frekvenční odezvy činného výkonu [50]

V testu 1/2 je sledována odezva funkce frekvenčně závislého režimu na skokové změny frekvence dle obr. 11-14. Výchozí hladina výkonu VM je minimální činný výkon VM. V průběhu změn frekvence nesmí dojít k omezení činného výkonu VM způsobením omezovačů.



obr. 11-14: Časový průběh simulované skokové změny frekvence a požadované [50]

Pro **vyhodnocení** dynamických parametrů průběhu frekvenční odezvy činného výkonu je použit mimo jiné graf na obr. 11-15.



obr. 11-15: Časový průběh frekvenční odezvy činného výkonu [50]

Dále je vyhodnocení řešeno kontrolou splnění **kritérií** pro splnění požadavků RfG na odezvu VM v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci [50]:

- Počáteční prodleva (zpoždění) v časovém průběhu odezvy činného výkonu P_{skut} na skokovou změnu frekvence musí být co nejkratší, $t_1 \leq 2$ s (pro synchronní VM). Pokud je tato prodleva delší, musí být zdůvodněna.
- Aktivace odezvy činného výkonu v plném rozsahu ΔP_1 jako důsledek skokové změny frekvence musí být dosaženo do doby $t_2 \leq 30$ s pro synchronní VM, resp. do doby $t_2 \leq 1$ s pro nesynchronní VM.
- Odezva činného výkonu P_{skut} na skokové změny frekvence nesmí mít kmitavý průběh, tj. nesmí docházet k netlumeným oscilacím P_{skut} . Kmitavým průběhem jsou netlumené kmity o velikosti amplitudy větší než $0,5 \% P_{max}^{23}$ nebo více než 4 tlumené kmity, kdy 4. amplituda je větší než $0,5 \% P_{max}$.
- Velikost odezvy činného výkonu P_{skut} musí odpovídat pro nastavenou statiku S_1 velikosti provedené změny frekvence (přes přepočtení změny frekvence na změnu výkonu) s tolerancí $\pm 0,75 \% P_{max}^{24}$. V těchto tolerančních mezích očekávané odezvy P_{set} se musí po ustálení nacházet průběh P_{skut} .

V **testu 2** je sledována **odezva na postupnou změnu frekvence** definovanou ilustrací na obr. 11-16. Trend změny frekvence je $0,001$ Hz/s. Hodnota f_{min} , resp. f_{max} je velikost frekvence, která odpovídá dosažení spodní, resp. horní hranice provozního regulačního pásma VM – -200 mHz, resp. 200 mHz. Test 2 se skládá ze tří simulací. **Test 2/1** začíná z maximálního činného výkonu VM. Nastavená statika S_1 odpovídá maximální velikosti frekvenční odezvy činného výkonu $\Delta P_1/P_{max}$ aktivované při maximální odchylce frekvence Δf pro frekvenčně závislý režim. Test je ukončen minimálně 30sekundovou prodlevou po návratu frekvence na hodnotu 50 Hz po jejím nárůstu, dle obr. 11-16. **Test 2/1** lze realizovat ve variantě, kdy počáteční činný výkon VM odpovídá rozdílu maximální hodnoty činného výkonu VM a hodnoty ΔP_1 (čímž nedojde k překročení horní hranice regulačního pásma VM (P_{max})). Simulován je pak celý průběh změny frekvence. **Test 2/2** začíná z minimální hodnoty činného výkonu VM a stejné hodnoty statiky jako v předchozím testu. Simulovaná frekvence začíná z hodnoty 50 Hz a její další průběh odpovídá druhé polovině průběhu frekvence na obr. 11-16, po níž následuje minimálně 30sekundová prodleva pro sledování ustálení výkonu zpět na výchozí hodnotě. **Test 2/2** lze realizovat ve variantě, kdy počáteční činný výkon VM odpovídá součtu minimální hodnoty činného výkonu VM a hodnoty ΔP_1 (čímž nedojde k překročení spodní hranice regulačního pásma VM (P_{min})). Simulován je pak celý průběh změny frekvence. **Test 2/3** začíná na střední hladině výkonu $P_{stř}$, které je dána rovnicí 11.1.

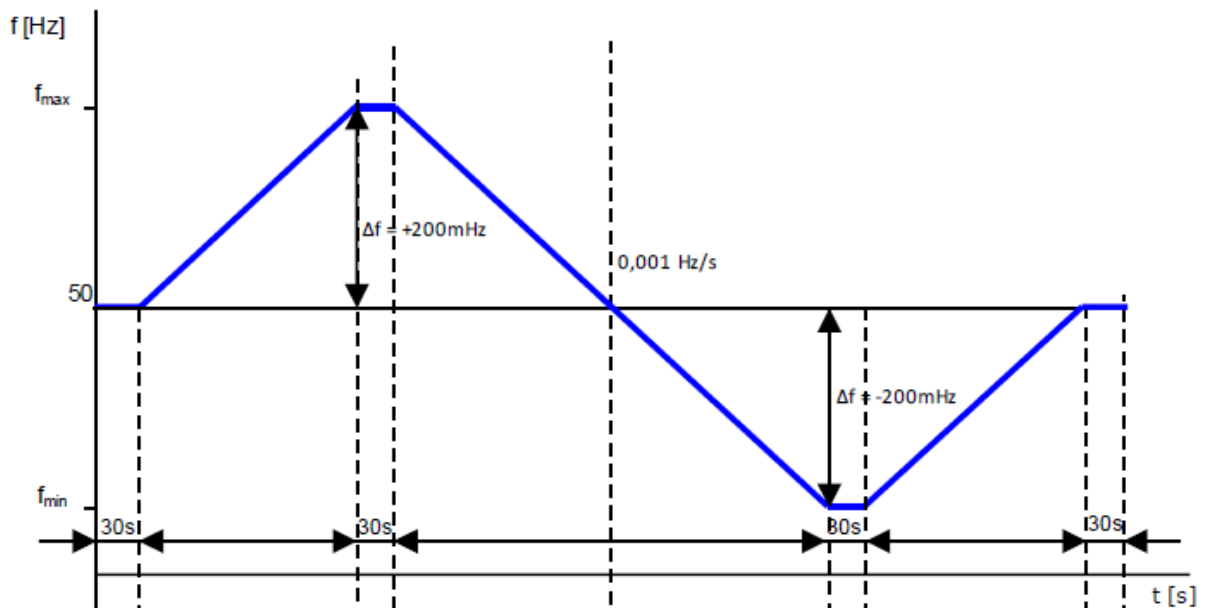
$$P_{stř} = \frac{P_{min} + P_{max}}{2} \quad (11.1)$$

V tomto testu je hodnota statiky S_1 rovna jednak hodnotě, která odpovídá maximální velikosti frekvenční odezvy činného výkonu $\Delta P_1/P_{max}$, aktivované při maximální odchylce frekvence Δf pro frekvenčně závislý režim (tak jako v testech 2/1 a 2/2), a jednak s nastavením krajních hodnot

²³ Hodnota $0,5$ vychází z požadavku na certifikaci FCP (pro test dynamického chování VM při velkých změnách frekvence) danou provozovatelem PS.

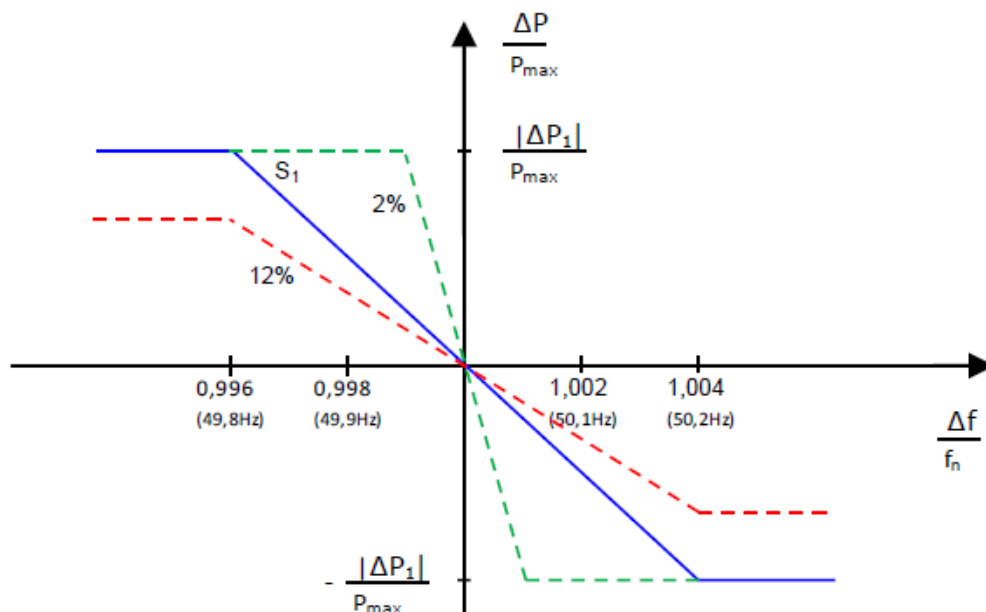
²⁴ Hodnota $0,75$ vychází z požadavku na certifikaci FCP.

rozmezí statiky 2 % a 12 % (pokud jsou různé od výše uvedeného nastavení). Simulovaná frekvence je zobrazena na obr. 11-16.



obr. 11-16: Časový průběh simulované plynulé změny frekvence [50]

Test 2/3 je tak rozdělen na tři části. V **testu 2/3a**, se statikou S_1 nastavenou dle rovnice 3.3 (strana 82), je plné velikosti frekvenční odezvy činného výkonu dosaženo při maximální odchylce frekvence Δf . V **testu 2/3b**, se statikou $S_1 = 2\%$, je plné velikosti frekvenční odezvy činného výkonu dosaženo při menší než maximální odchylce frekvence Δf . V **testu 2/3c**, se statikou $S_1 = 12\%$, není plné velikosti frekvenční odezvy činného výkonu dosaženo ani při maximální odchylce frekvence Δf (velikost ΔP_1 není vyčerpána). Graficky závislost výkonu a frekvence v rámci testů 2/3a, 2/3b a 2/3c znázorňuje obr. 11-17.

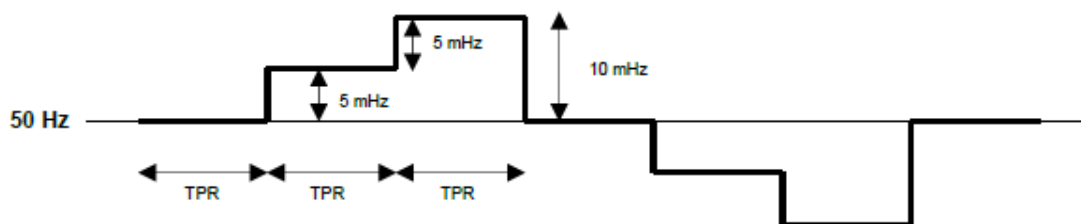


obr. 11-17: Uvolňování ΔP_1 pro různé hodnoty S_1 [50]

Dalším **kritériem** pro splnění požadavků RfG na odezvu VM v omezeném frekvenčně závislém režimu je [50]:

- e) Z průběhu změny frekvence f a odpovídající změny P_{skut} se pro oba směry změny vypočte statika, která se nesmí lišit od nastavené hodnoty statiky o více než $\pm 15\%$. Ze získaných bodů se pomocí lineární regrese „metodou nejmenších čtverců“ proloží regresní přímka a ze směrnice této přímky se vypočte statika.

V **testu 3** je sledována **necitlivost frekvenční odezvy** funkce frekvenčně závislého režimu. Testovací signál frekvence je zobrazen na obr. 11-18. Časová prodleva TPR má mít hodnotu minimálně 30 s. Pro **test 3/1** je výchozí hladina výkonu maximální činný výkon VM. Dle metodiky [50] je doporučeno snížit výchozí výkon o hodnotu ΔP_1 , aby v průběhu testu nedošlo k překročení hranic regulačního pásma VM. Pro **test 3/2** je výchozí hladina výkonu minimální činný výkon VM. Zde je doporučeno pro změnu zvýšit výchozí výkon o hodnotu ΔP_1 .



obr. 11-18: Časový průběh simulovaných skokových změn frekvence [50]

Dalším **kritériem** pro splnění požadavků RfG na odezvu VM v omezeném frekvenčně závislém režimu je [50]:

- f) Z průběhu změny frekvence f a odpovídající změny P_{skut} se ověří velikost reálné necitlivosti frekvenční odezvy výkonu, která nesmí být větší než 10 mHz. Činný výkon se musí začít měnit odpovídajícím způsobem do překročení této hodnoty změny frekvence.

Popis simulací

Nominální výkon všech modelů zdrojů byl zvolen 25 kW při nominálním napětí v místě připojení 0,4 kV. Zdroje pracují s účínkem 1, s deaktivovaným blokem ochrany a deaktivovanými výkonovými křivkami. Dle požadavku na nastavení simulace testu 1 metodika neřeší, zdali v rámci funkce frekvenčně závislého režimu dochází k zastropování omezení činného výkonu fakticky od dosažení meze pásma necitlivosti frekvenční odezvy nebo od vyčerpání rozsahu činného výkonu alokovaného dané funkci. Tento fakt je dán požadavkem metodiky na nastavení takové statiky S_1 , kterou bude dosaženo vyčerpání rozsahu činného výkonu pro frekvenčně závislý režim právě při dosažení mezi pásma necitlivosti frekvenční odezvy. Funkci výběru minima při poklesu frekvence, resp. výběru maxima při nárůstu frekvence pak ověří až test 3, při simulaci s krajními hodnotami nastavení statiky.

Pro všechny simulace **testů 1 a 2** platí nastavení statiky $S_1 = 4\%$. Pro **všechny testy** platí, že hodnota rezervy činného výkonu $\Delta P_1/P_{\text{max}} = 10\%$, což v absolutní hodnotě výkonu znamená rozsah $\pm 2,5$ kW. Výkonová odezva na změnu frekvence je počítána vždy z nominální hodnoty výkonu VM. Časová konstanta funkce byla zvolena 0,001 s. Necitlivost frekvenční odezvy je nastavena na 0 Hz a pásmo frekvenční odezvy na 200 mHz. Funkce frekvenčně závislého režimu je vždy blokována do 15. sekundy simulace (čas aktivace funkce), kvůli nulové hodnotě nastavení necitlivosti frekvenční odezvy a nepleše a velkému špatnému, kterou by to nadělalo během inicializace a naježdění zdroje. Počáteční prodleva (dle metodiky 30 s) byla zkrácena na 20 s, což je dostatečná doba pro najetí a ustálení zdrojů v rámci zvolených nastavení. **Test 1/1** začíná z maximální hodnoty výkonu zdroje – 25 kW. Časová prodleva TPR byla zkrácena na 10 s, což je

dostatečná doba pro ustálení výstupu frekvenční odezvy, resp. ustálení výstupního výkonu zdroje. Zaznamenané průběhy zahrnují i reakci VM na pokles frekvence, kdy by logicky nemělo dojít k žádnému poklesu výkonu VM. **Test 1/2** začíná z minimální hodnoty výkonu zdroje – 8 kW. Podobně byla časová prodleva TPR pro test zkrácena na 10 s. Zaznamenané průběhy zahrnují i reakci VM na nárůst frekvence, kdy by logicky nemělo dojít k žádnému poklesu výkonu VM. **Test 2/1** začíná z maximální hodnoty výkonu zdroje – 25 kW. Časová prodleva TPR byla zkrácena na 10 s. Trend změny frekvence byl pro tento test zvýšen z hodnoty 0,001 Hz/s na 0,005 Hz/s z důvodu zkrácení výpočtového času simulace, při zachování návazností nutných pro ověření funkce modelu. Pro ilustraci správné funkce modelu byl zachován i průběh testovací frekvence pod nominální hodnotou frekvence. **Test 2/2** začíná z minimální hodnoty výkonu zdroje – 8 kW. Časová prodleva TPR byla zkrácena na 10 s. Trend změny frekvence byl opět upraven na 0,005 Hz/s. Pro ilustraci správné funkce modelu byl zachován i průběh testovací frekvence nad nominální hodnotou frekvence. **Test 2/3** začíná z hodnoty výkonu zdroje 16,5 kW. Tato hodnota je dána rovnicí 11.1. Pro **test 2/3a** je použita statika $S1 = 4 \%$, pro **test 2/3b** je použita statika $S1 = 2 \%$ a pro **test 2/3c** je použita statika $S1 = 12 \%$. V tab. 11-2 jsou uvedeny informace dosažení mezních hodnot nastavení pásma necitlivosti frekvenční odezvy (± 200 mHz) a čerpání nastavené rezervy činného výkonu (10% z $P_{nom} \sim 2,5$ kW). Trend změny frekvence byl opět upraven na 0,005 Hz/s. Pro ilustraci výsledků simulací **testů 2/3** je uveden průběh **testu 2/3a, b i c** pro jedno nastavení regulátoru v jednom grafu.

tab. 11-2: Mezní hodnoty pro test 2/3 frekvenčně závislého režimu

test 2/3	statika	odchylka frekvence při vyčerpání výkonové rezervy ΔP_1 (2,5 kW)	uvolněná výkonová rezerva ΔP_1 při dosažení pásma necitlivosti (± 200 mHz)
b	2 %	± 100 mHz	2,500 kW
a	4 %	± 200 mHz	2,500 kW
c	12 %	nevyčerpáno	0,833 kW

Test 3/1 začíná z hodnoty výkonu zdroje 22,5 kW, což je rozdíl maximální hodnoty výkonu VM (25 kW) a nastavené výkonové rezervy ($\Delta P_1 = 2,5$ kW). Počáteční časová prodleva byla zkrácena na 20 s a časové prodlevy TPR mezi jednotlivými frekvenčními skoky byly zkráceny na 10 s. **Test 3/2** začíná z hodnoty výkonu zdroje 10,5 kW, což je součet minimální hodnoty výkonu VM (8 kW) a nastavené výkonové rezervy. Test probíhal opět se zkrácenými časy prodlev.

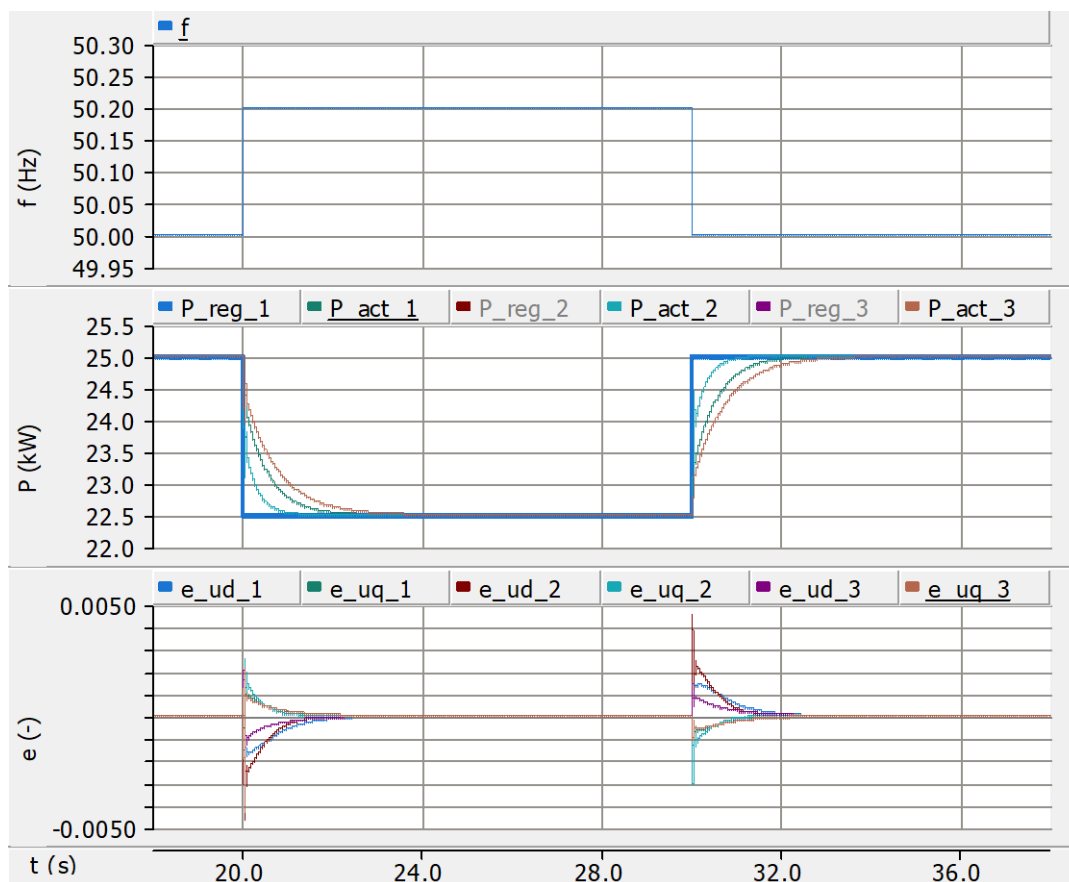
Funkce závislosti velikosti činného výkonu při odchylce frekvence v místě připojení (v síti) má přesně definovanou charakteristiku. Jejím uplatněním vzniká požadavek na velikost činného výkonu, který vstupuje na samotný regulátor výkonu zdroje. To, jestli a jak dojde k uplatnění požadavku na velikost činného výkonu zdroje pak závisí právě na konstrukci a nastavení regulátoru a uplatnění výstupu regulátoru v silové návaznosti. Silová návaznost v simulačním prostředí je opět matematický popis funkce reálných systémů. Tato silová návaznost je reprezentována přímo napětovým zdrojem u modelu s napětovým zdrojem, resp. střídačem u IBG modelu, resp. synchronním generátorem u SG modelu VM. Všechny tyto silové návaznosti jsou v modelech umístěny v modulu samotného zdroje (U, SG, IBG). Pro kompletní analýzu modelu je tak možné řešit, zkoumat a hodnotit různé elementy a návaznosti tohoto řetězce při různých nastaveních jednotlivých částí daného řetězce. Požadavkem metodiky je hodnotit pouze výstupní činný výkon zdroje a frekvenci vnucenou zdroji. V následujících podkapitolách je mimo to řešeno ještě různé nastavení regulátoru, které je ve výsledku hodnoceno na základě průběhu regulační odchylky. Nastavení regulačních obvodů VM totiž do značné míry určuje celkové chování VM. Popis

konkrétního nastavení regulátoru VM není v tomto dokumentu přímo uvedeno – lze ho nalézt přímo v souboru simulace dané zkoušky, v rámci příloh této práce, které jsou vždy uvedeny u příslušného setu simulací.

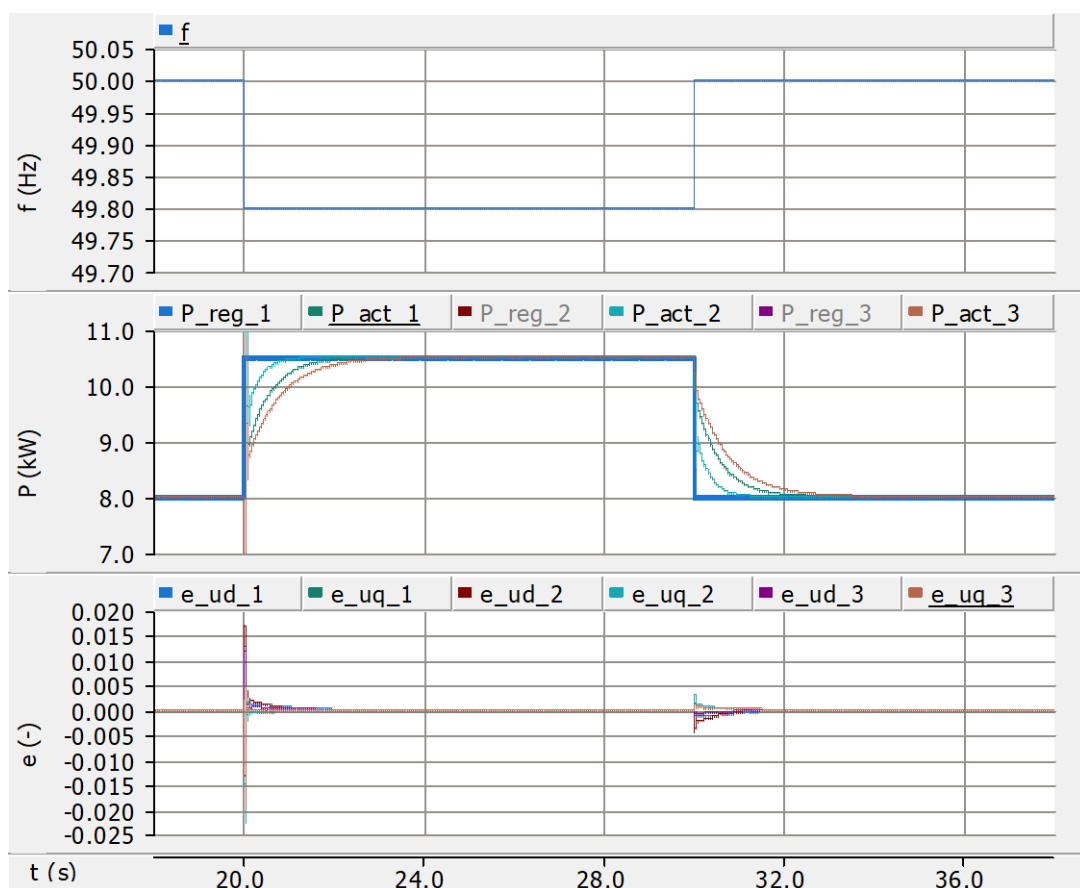
Provedení simulací

Simulace byly provedeny pro tři různá nastavení parametrů regulačního obvodu. Konkrétní nastavení lze dohledat přímo v nastavení modelů VM v souboru SMe03U.pscx a konkrétní simulace lze revidovat změnou stavu vrstvy a přepínače vztahující se ke konkrétnímu testu. Grafy na obr. 11-19 až obr. 11-25 znázorňují průběhy sledovaných veličin pro testy 1/1, 1/2, 2/1, 2/2, 2/3a, 2/3b, 2/3c, 3/1 a 3/2.

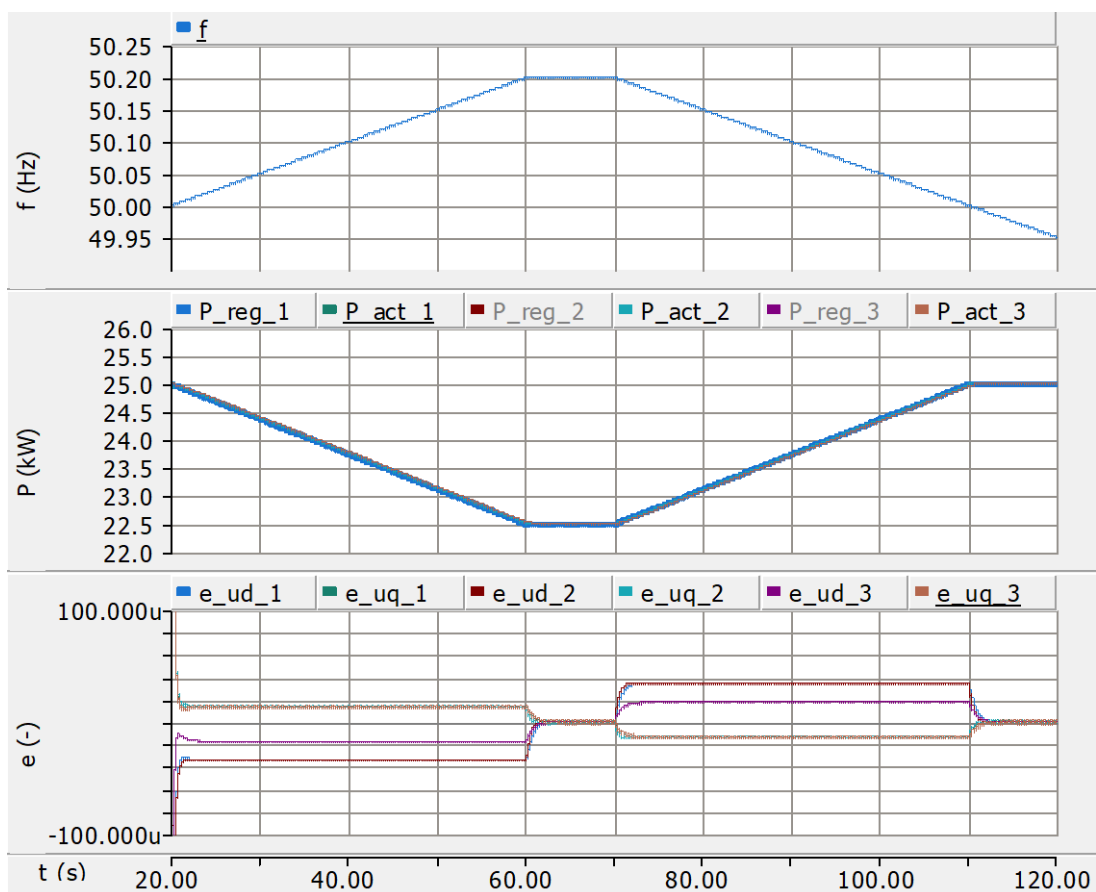
Všechny simulované průběhy splňují kritéria simulace odezvy ve frekvenčně závislém režimu.



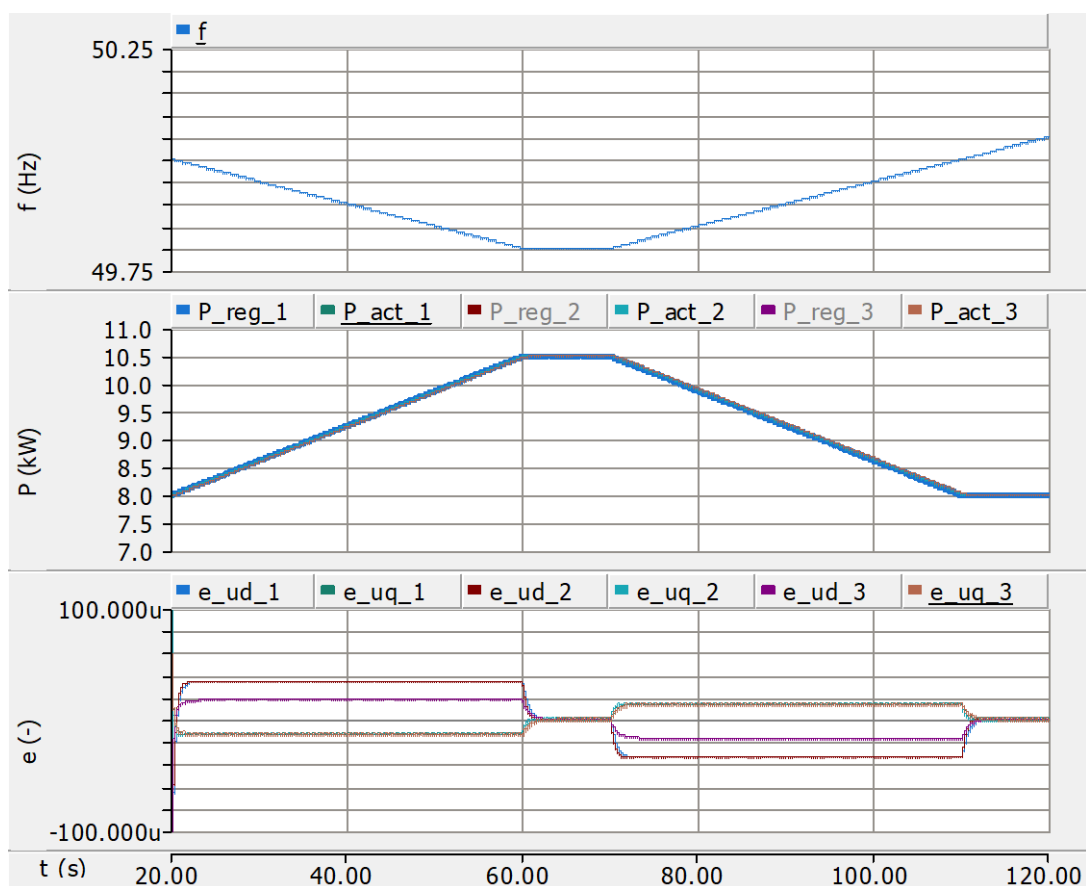
obr. 11-19: SMe03U – test 1/1



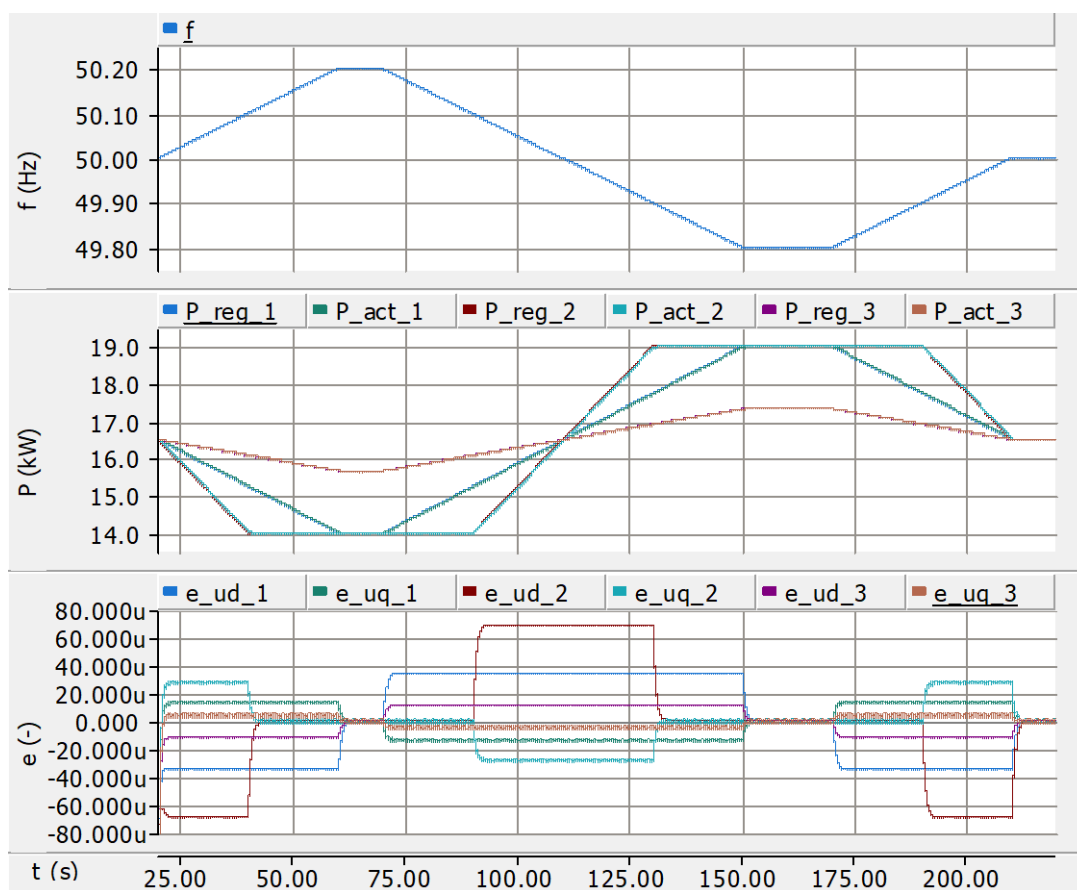
obr. 11-20: SMe03U – test 1/2



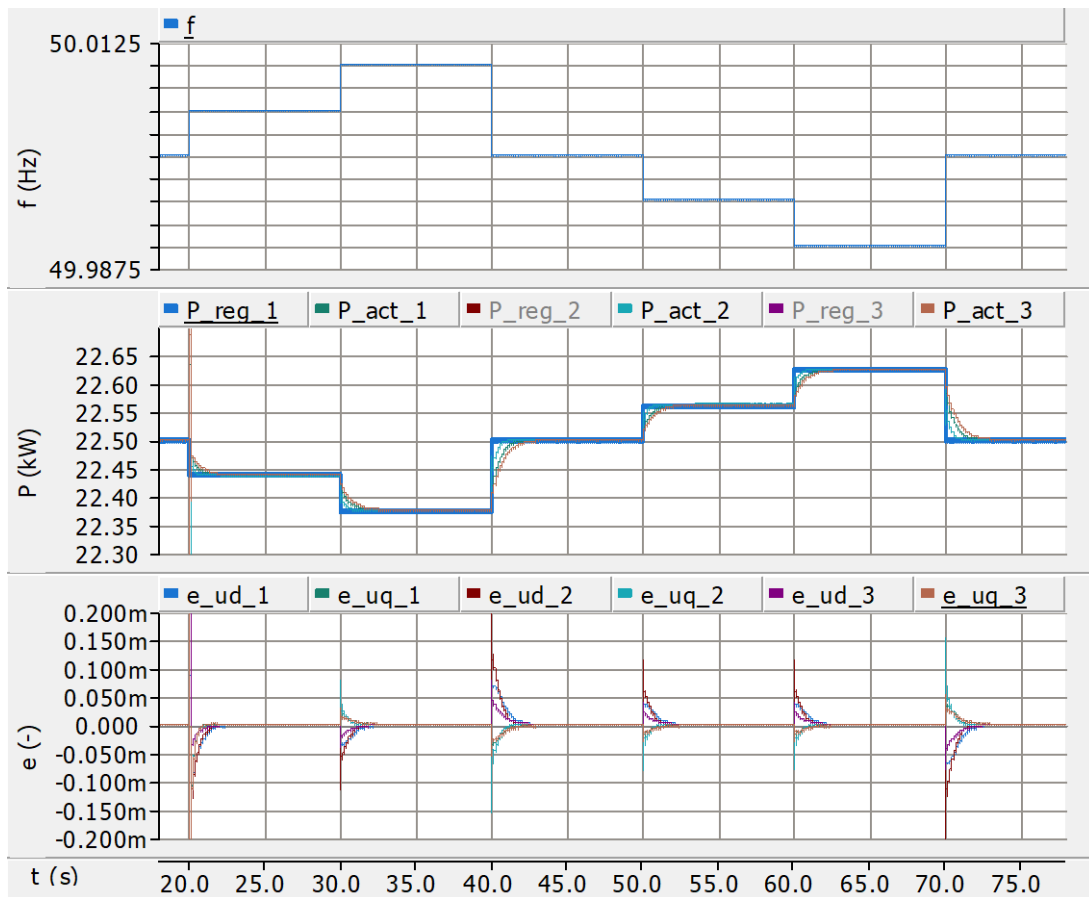
obr. 11-21: SMe03U – test 2/1



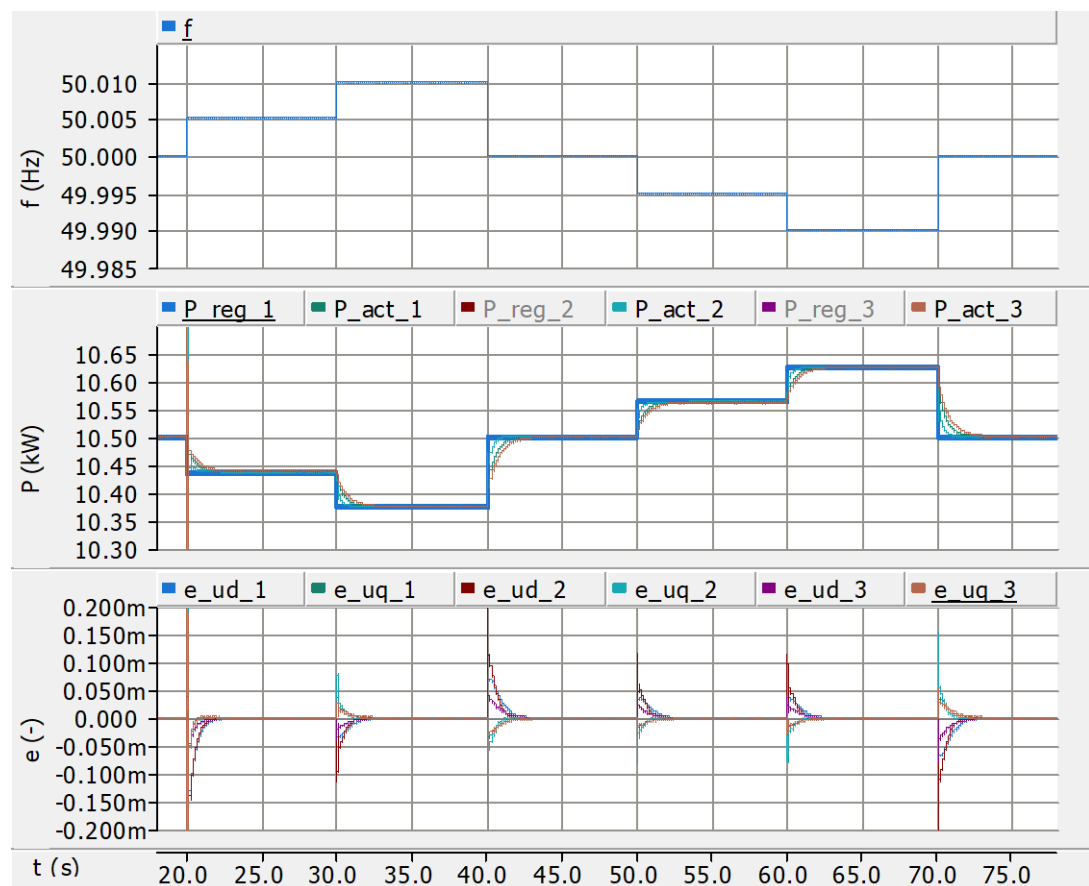
obr. 11-22: SMe03U – test 2/2



obr. 11-23: SMe03U – testy 2/3a, 2/3b a 2/3c



obr. 11-24: SMe03U – test 3/1



obr. 11-25: SMe03U – test 3/2

11.1.4 Simulace schopnosti překlenout poruchu (FRT)

Projekty pro simulace: SMe04U.pscx, SMe04IBG.pscx a SMe04SG.pscx.

Simulace byly sestaveny podle požadavků metodiky ověření souladu s požadavky RfG pro výrobní moduly typu C a D [50].

Cíle simulace jsou uvedeny v kapitole Simulace schopnosti překlenout poruchu (FRT), která je součástí kapitoly 3.1.5.

Výchozí stav simulace je dodávka určitého výkonu VM do sítě. Dodávaný výkon odpovídá stanovenému bodu P-Q diagramu v bodech specifikovaných certifikátorem či PS (v ose činného výkonu v bodě maximálního (P_{\max}), minimálního (P_{\min}) či středního ($P_{\text{stř}}$) výkonu nebo jiném výkonu určeného certifikátorem či PS, a v ose jalového výkonu v podbuzení (Q_{\min}), přebuzení (Q_{\max}), nulové hodnotě nebo jiném bodě určeném certifikátorem či PS. Dále provoz soustavy, do níž VM pracuje, odpovídá běžnému stavu před simulovanou poruchou s napětím v místě připojení VM 1 p.j. U_n . Testy jsou prováděny přivedením signálu konkrétní FRT křivky na vstup VM, který reprezentuje měření napětí v místě připojení VM k síti.

Sledované veličiny jsou skutečný činný výkon VM (P_{skut}), skutečný jalový výkon VM (Q_{skut}) a simulované napětí v místě připojení VM k ES (U_p). Zaznamenává se jejich časový průběh během simulovaných změn napětí podle FRT křivky.

V **testu 1** probíhají simulace pro různé počáteční a zároveň žádané hodnoty činného výkonu VM – P_{\max} , P_{\min} a $P_{\text{stř}}$ v kombinaci s různými počátečními a zároveň žádanými hodnotami jalového výkonu VM – Q_{\min} , Q_{\max} a 0. Jedná se tedy o celkem 9 simulací pro jeden VM. Pro SVM odpovídá hodnota P_{\max} maximální kapacitě VM, pro NVM výkonu nad 60 % maximální kapacity VM. Pro SVM odpovídá hodnota P_{\min} minimální regulační úrovni VM, pro NVM výkonu v rozmezí 10 až 20 % maximální kapacity VM. Pro SVM odpovídá hodnota $P_{\text{stř}}$ pracovnímu bodu činného výkonu VM mezi P_{\min} a P_{\max} , pro NVM výkonu v rozmezí 30 až 50 % maximální kapacity VM. Konkrétní hodnoty činného a jalového výkonu jsou stanoveny podle požadavků PS.

Po dosažení injektované hodnoty napětí $0,85 U_n$ následuje časová prodleva TPR alespoň 1 min., a následně je postupnými kroky velikostí maximálně $0,05 U_n$ s časovými prodlevami TPR dosaženo nominální úrovně napětí.

Vyhodnocení je řešeno kontrolou splnění **kritérií** pro splnění požadavků RfG na schopnost VM překlenout poruchu [50]:

- a) VM se nesmí odpojit od soustavy v případě poklesu napětí definované příslušnou FRT křivkou (dle dané kategorie synchronního, resp. nesynchronního výrobního modulu) a musí nadále stabilně pracovat.

Popis simulací

Nominální výkon všech modelů zdrojů byl zvolen 25 kW při nominálním napětí v místě připojení 0,4 kV. Zdroje pracují s deaktivovaným blokem ochran a deaktivovanými výkonovými křivkami. Minimální regulační úroveň VM je 5 kW a střední výkon je 15 kW. Stav maximálního podbuzení a přebuzení odpovídá účinníku 0,9.

Test 1 je rozdělen do bodů *a* až *i*, dle kombinace výchozí a žádané hodnoty činného a jalového výkonu zdroje. Kombinace testu 1 uvádí tab. 11-3. Pro ilustraci výsledků simulací testů 1 jsou uvedeny souhrnně průběhy pro testy 1a, 1b a 1c, resp. 1d, 1e a 1f, resp. 1g, 1h, 1i pro jedno nastavení regulátoru vždy v jednom grafu.

tab. 11-3: Kombinace výchozích a žádaných hodnot činného a jalového výkonu pro simulace schopnosti VM překlenout poruchu

test 1	P (kW)	Q (kVAr)
a	25	-12,11
b	25	12,11
c	25	0
d	15	-7,26
e	15	7,26
f	15	0
g	5	-2,42
h	5	2,42
i	5	0

Pro realizaci průběhu FRT křivky byl použit modul FRT, v němž byly nastaveny požadované průběhy dle tabulek křivek uvedených v kapitole Simulace schopnosti překlenout poruchu (FRT) (strana 82)

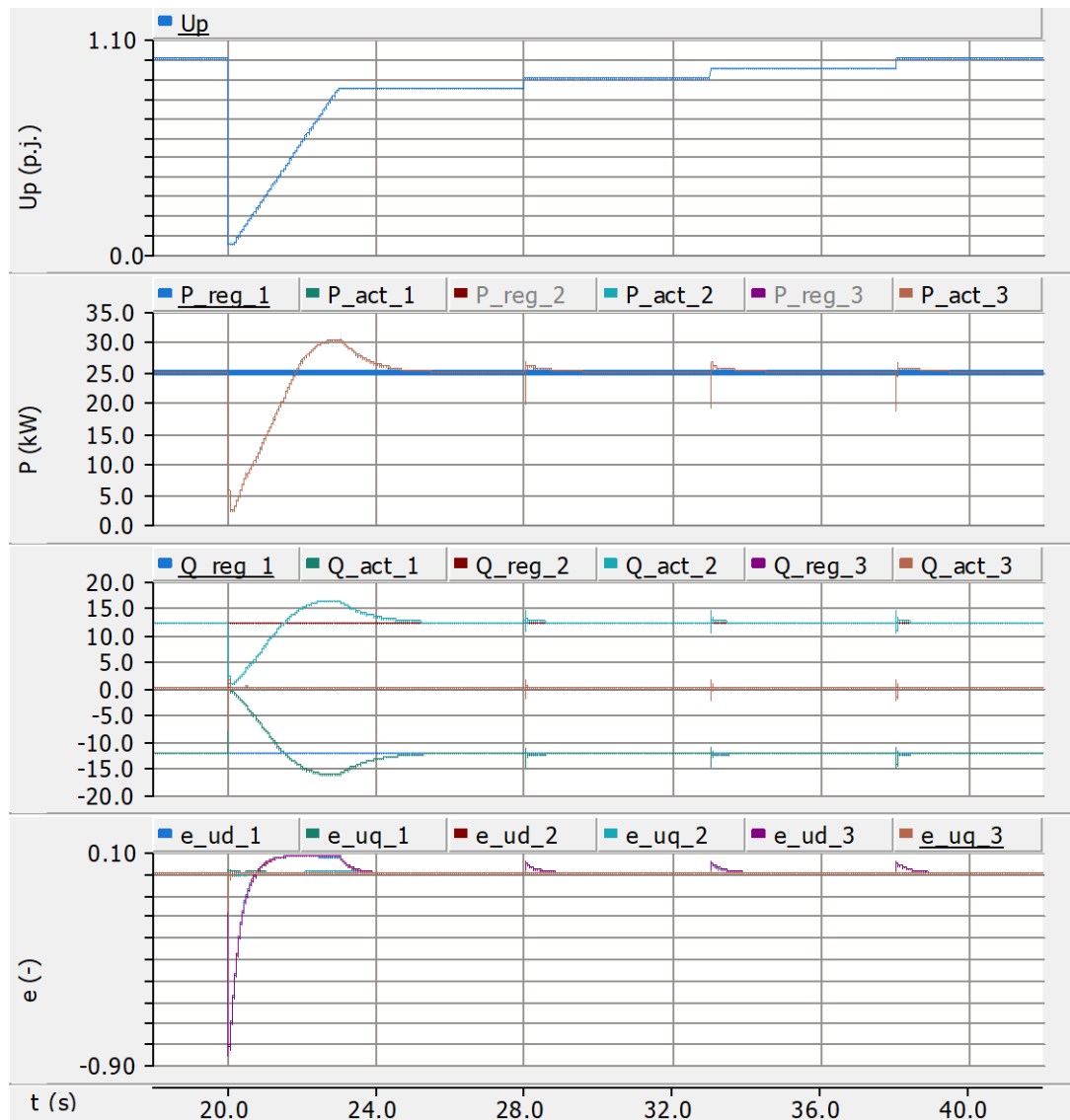
Funkce schopnosti VM překlenout poruchu je dána zejména schopností regulačního algoritmu správně a rychle reagovat na vzniklý pokles napětí v síti. Výsledky simulací tak budou opět závislé na robustnosti a nastavení regulační smyčky VM, u SVM pak také regulací v rámci parního okruhu či obecně, v místě před generátorem, ve strojní části technologie VM. Opět platí informace a závěry uvedené v předchozích podkapitolách této kapitoly.

Provedení simulací

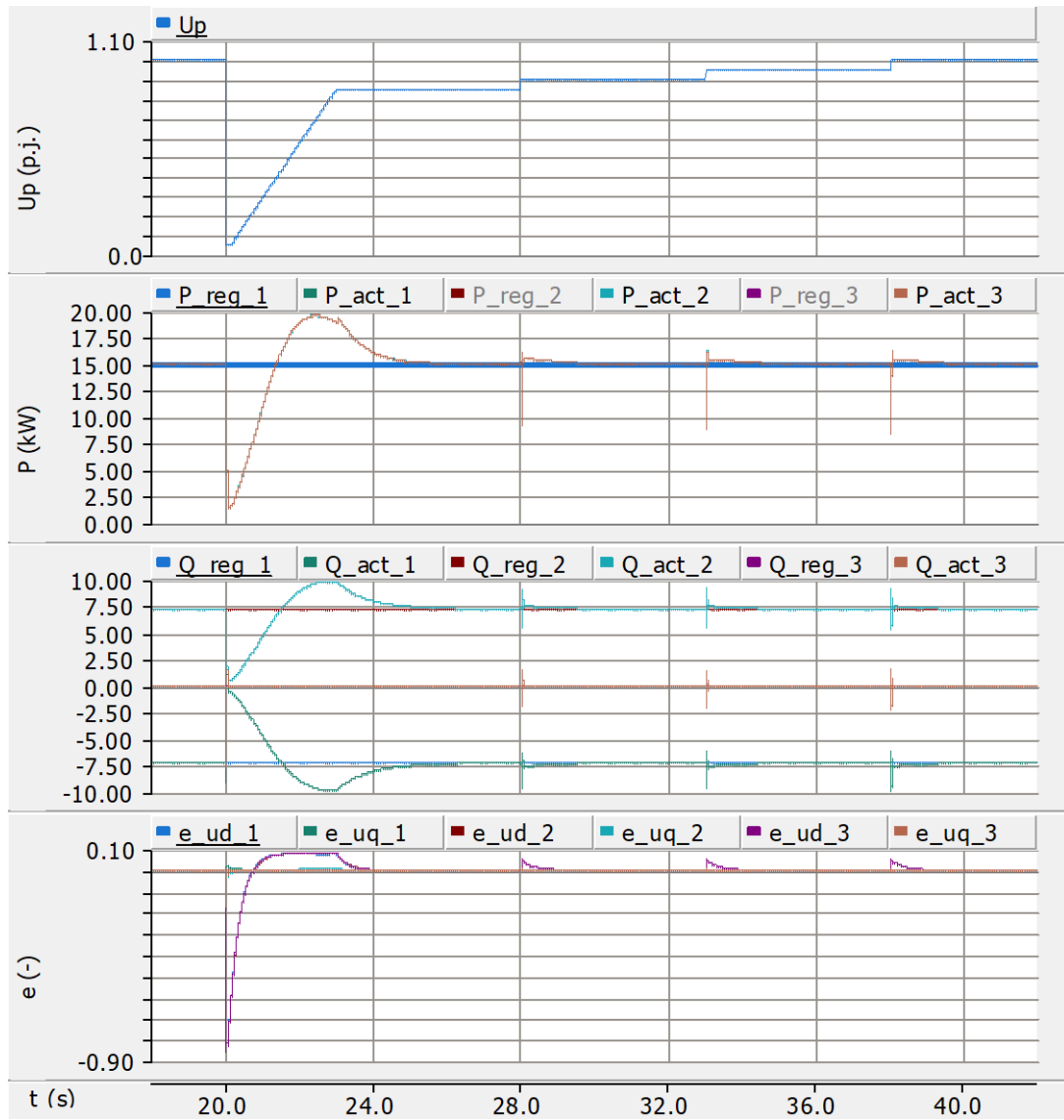
Simulace byly provedeny pro tři různá nastavení parametrů regulačního obvodu. Konkrétní nastavení lze dohledat přímo v nastavení modelů VM v souboru SMe04U.pscx a konkrétní simulace lze revidovat změnou stavu přepínače vztahující se ke konkrétnímu testu. Grafy na obr. 11-26 až obr. 11-28 znázorňují průběhy sledovaných veličin pro testy 1a až 1i (souhrnně po trojicích).

Všechny simulované průběhy splňují kritéria simulace odezvy ve frekvenčně závislém režimu.

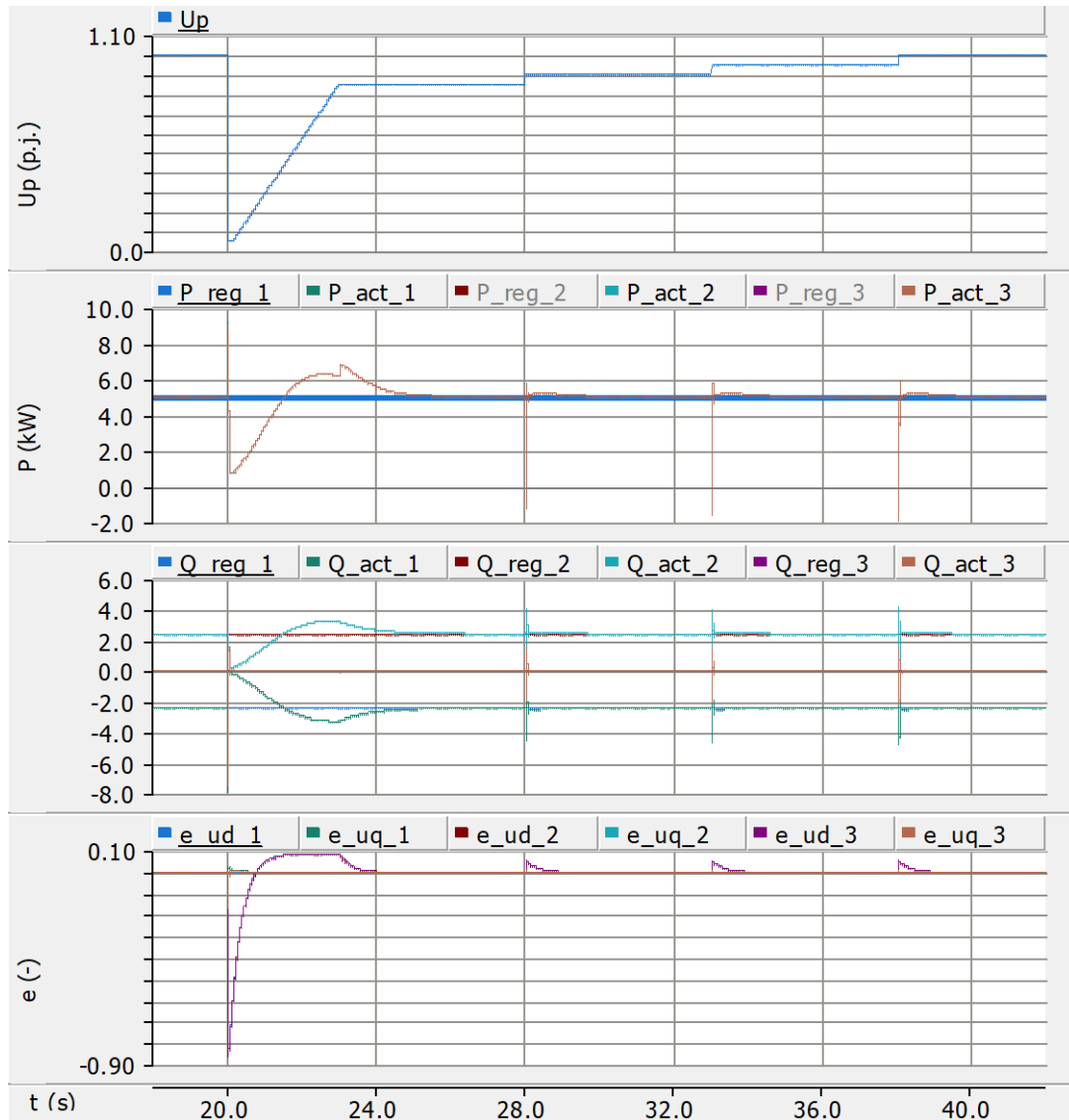
Pozn.: Průběhy skutečných činných výkonů (P_{act}) a regulačních odchylek (e_{ud}) zdrojů se v obr. 11-26 až obr. 11-28 překrývají.



obr. 11-26: SMe04U – test 1a, 1b a 1c



obr. 11-27: SMe04U – test 1d, 1e a 1f



obr. 11-28: SMe04U – test 1g, 1h a li

11.1.5 Simulace obnovení činného výkonu po poruše (Post Fault Active Power Recovery)

Simulace přímo navazují na simulace schopnosti překlenout poruchu, které jsou řešeny v rámci předchozí kapitoly. Proto, projekty pro simulace jsou opět SMe04U.pscx, SMe04IBG.pscx a SMe04SG.pscx.

Výchozí stav a sledované veličiny, stejně tak jako samotný **test 1** jsou stejné jako pro simulaci schopnosti překlenout poruchu.

Vyhodnocení je řešeno kontrolou splnění **kritérií** pro splnění požadavků RfG na schopnost VM překlenout poruchu [50]:

- SVM musí obnovit činný výkon do 3 s od vzniku poruchy na původní hodnotu P_{skut} před poruchou s dovolenou odchylkou ± 5 %.
- NVM musí obnovit činný výkon do 1 s po dosažení 85 % U_n na původní hodnotu P_{skut} před poruchou (nebo na maximální hodnotu s ohledem na dostupný zdroj energie) s dovolenou odchylkou ± 5 %. Pokud VM během poruchy dodává prioritně jalový výkon, musí se činný výkon obnovit do 1 s po dosažení 95 % U_n na původní hodnotu P_{skut} .

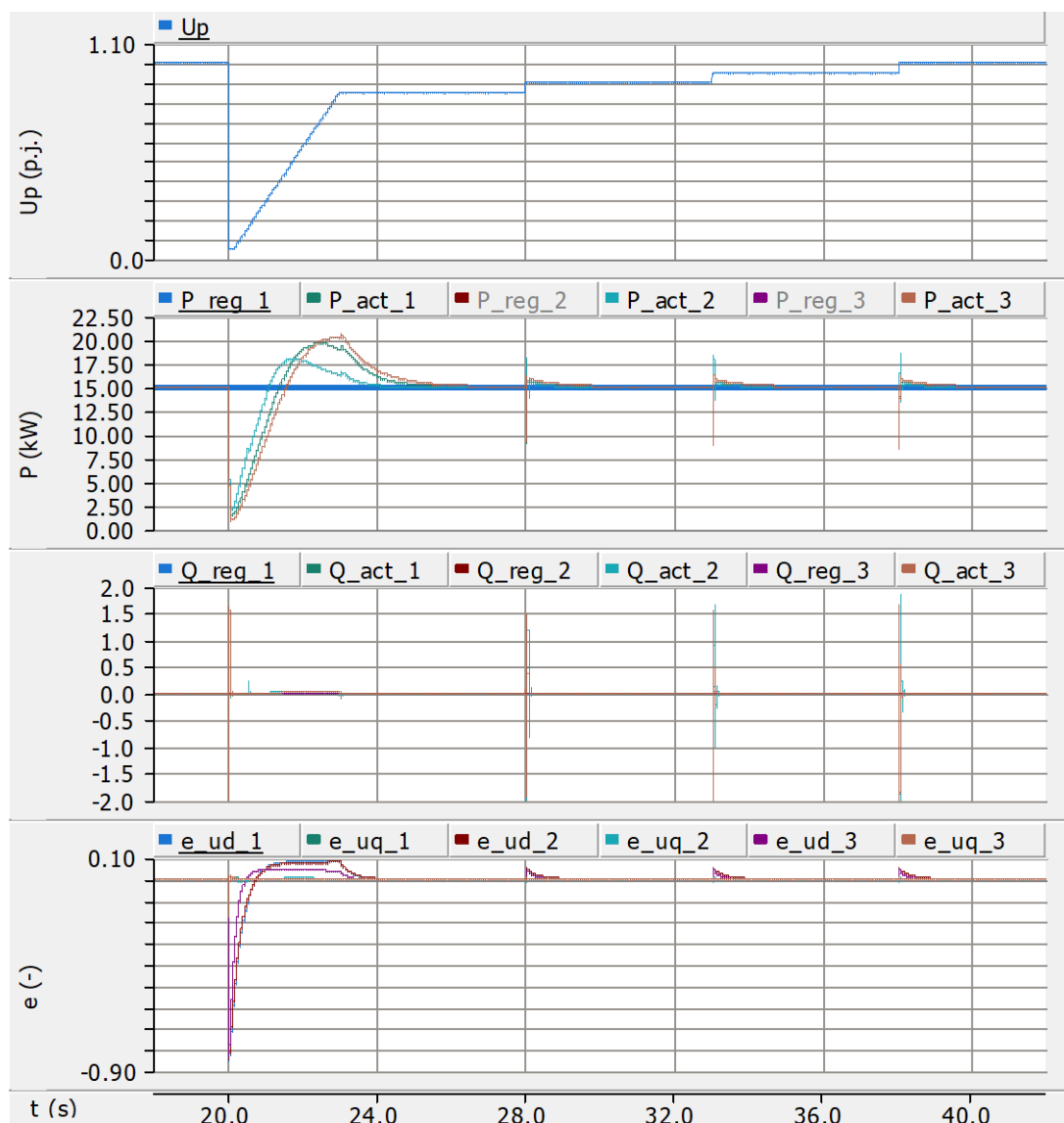
před poruchou s dovolenou odchylkou $\pm 5\%$ (obnova činného výkonu je v tomto případě zahájena až po dosažení $95\% U_n$).

Popis simulací

Popis simulací je totožný se simulacemi schopnosti překlenout poruchu uvedených v předchozí podkapitole.

Provedení simulací

Simulace požadavku na obnovení činného výkonu po poruše se dá vztáhnout i k funkci regulačního obvodu. Příkladem výstupu uvedeným v této práci je test 1f, jehož výsledky v obr. 11-29 jsou uvedeny pro tři různá nastavení regulačního obvodu řízení výkonu zdroje.



obr. 11-29: SMe04U – test 1f

11.1.6 Simulace ostrovního provozu (Island Operation)

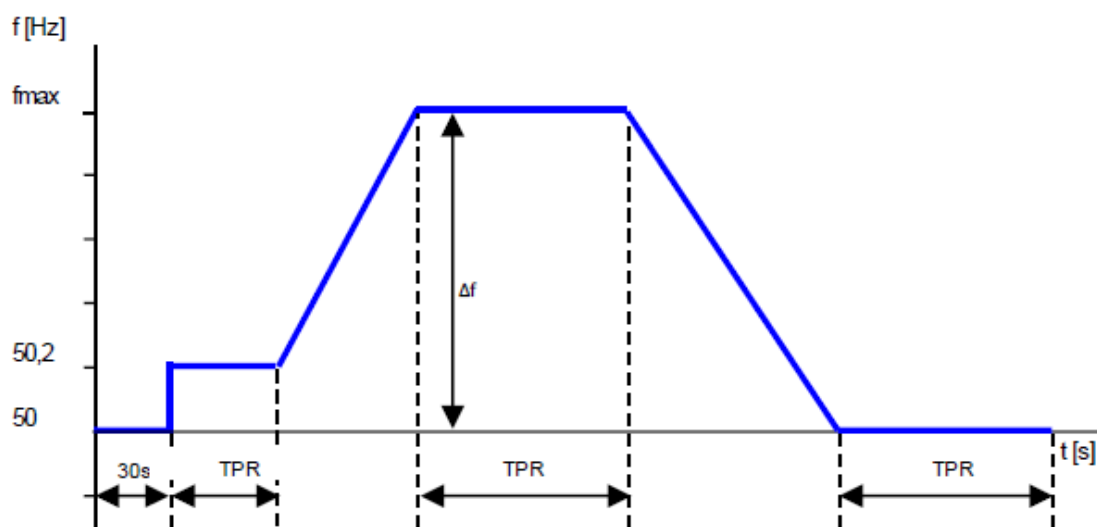
Projekty pro simulace: SMe06U.pscx, SMe06IBG.pscx a SMe06SG.pscx.

Simulace byly sestaveny podle požadavků metodiky ověření souladu s požadavky RfG pro výrobní moduly typu C a D [50]. Cíle simulace jsou uvedeny v kapitole Simulace ostrovního provozu (Island Operation), která je součástí kapitoly 3.1.5.

Výchozí stav simulace je dodávka určitého výkonu VM do sítě. Dodávaný výkon odpovídá stanovenému bodu P-Q diagramu v bodech specifikovaných certifikátorem či PS (v ose činného výkonu v bodě maximálního (P_{\max}), minimálního (P_{\min}) či středního ($P_{\text{stř}}$) výkonu nebo jiném výkonu určeného certifikátorem či PS, a v ose jalového výkonu v podbuzení (Q_{\min}), přebuzení (Q_{\max}), nulové hodnotě nebo jiném bodě určeném certifikátorem či PS). Dále provoz soustavy, do níž VM pracuje, odpovídá běžnému stavu před simulovanou poruchou s napětím v místě připojení VM 1 p.j. U_n . Nastavení statik S_1 a S_2 příslušných frekvenčně závislých režimů odpovídá nastavení statik během simulací samotných frekvenčně závislých režimů. Stejně tak i pásmo necitlivosti je nastaveno na 0 Hz. Režimy LFSM-O, LFSM-U a FSM jsou aktivní.

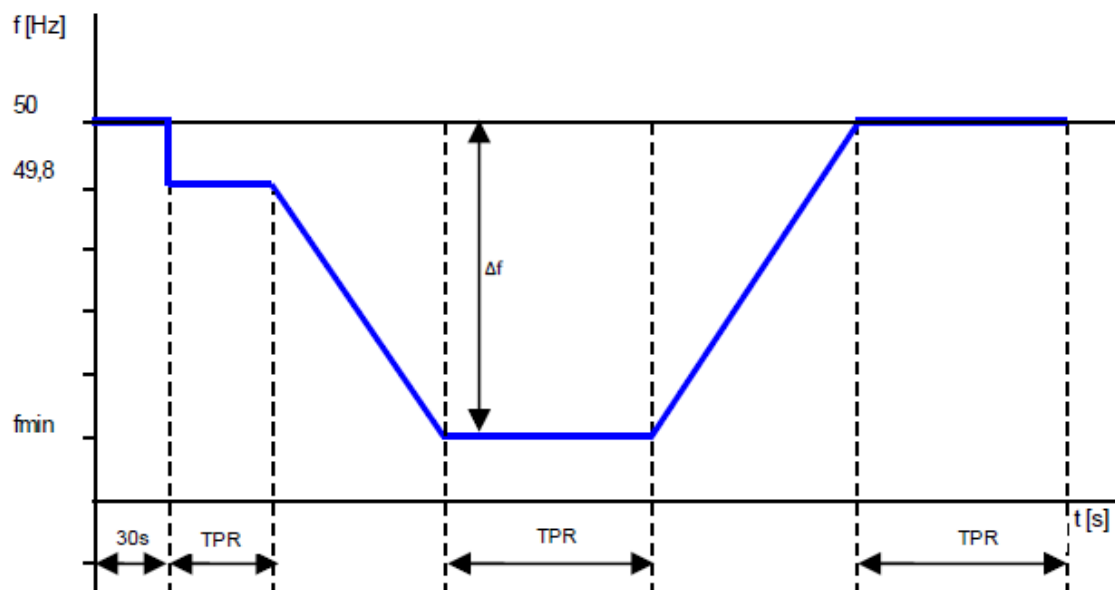
Sledované veličiny jsou skutečný činný výkon VM (P_{skut}), skutečný jalový výkon VM (Q_{skut}), simulované napětí v místě připojení VM k ES (U_p) a simulovaná frekvence na vstupu do regulátoru (f).

V **testu 1** je sledována **odezva na plynulou změnu frekvence**. **Test 1/1** začíná z maximální hodnoty činného výkonu VM. Dále jsou v rámci testu rozlišeny tři hodnoty jalového výkonu – Q_{\min} , Q_{\max} a 0 kVAr, čímž jsou vytvořeny testy **1/1a** (Q_{\min}), **1/1b** (Q_{\max}) a **1/1c** (0 kVAr). V každém testu je vždy sledována odezva na změny frekvence dle obr. 11-30. Časová prodleva TPR by měla být v intervalu 1 a 5 minut. Trend lineárních změn frekvence je $\pm 0,02$ Hz/s.



obr. 11-30: Časový průběh simulované změny frekvence pro simulaci ostrovního provozu [50]

Test 1/2 začíná z minimální hodnoty činného výkonu (spodní hranice provozního regulačního pásma) VM. Stejně jsou rozlišeny tři hodnoty jalového výkonu a vytvořeny testy **1/2a** (Q_{\min}), **1/2b** (Q_{\max}) a **1/2c** (0 kVAr). V každém testu je vždy sledována odezva na změny frekvence dle obr. 11-31. Časová prodleva TPR by měla být v intervalu 1 a 5 minut. Trend lineárních změn frekvence je $\pm 0,02$ Hz/s.



obr. 11-31: Časový průběh simulované změny frekvence pro simulaci ostrovního provozu [50]

Vyhodnocení je řešeno kontrolou splnění **kritérií** pro splnění požadavků RfG na schopnost VM překlenout poruchu [50]:

- Přechod do režimu OP při dosažení odchylky frekvence ± 200 mHz.
- Odezva činného výkonu P_{skut} a její průběh musí odpovídat změnám frekvence (přes přepočítání změny frekvence na změnu výkonu). (Pozn.: Sčítá se příspěvek ΔP režimů FSM a LFSM.
- VM musí být schopen snížit činný výkon na výstupu na hodnotu odpovídající $P_{\text{min}} \leq 55 \% P_{\text{max}}$.
- V průběhu testu nesmí dojít k zapůsobení ochrany ani limitačního systému, které by vedly k odpojení VM od ES a nesmí dojít k vybočení hodnot napětí a frekvence z dovolených mezí.

Popis simulací

Nominální výkon všech modelů zdrojů byl zvolen 25 kW při nominálním napětí v místě připojení 0,4 kV. Zdroje pracují s deaktivovaným blokem ochrany a deaktivovanými výkonovými křivkami. Minimální regulační úroveň VM je 8 kW. Stav podbuzení a přebuzení odpovídá účinnosti 0,9.

Test 1 je má nastavení frekvenčně závislého režimu totožné s nastavením během simulace odezvy ve frekvenčně závislém režimu: statika $S_1 = 4 \%$, rezerva činného výkonu $\Delta P_1/P_{\text{max}} = 10 \%$, což v absolutní hodnotě výkonu znamená rozsah $\pm 2,5$ kW (výkonová odezva na změnu frekvence je počítána vždy z nominální hodnoty výkonu VM), časová konstanta funkce je 0,001 s, necitlivost frekvenční odezvy je 0 Hz a pásmo frekvenční odezvy 200 mHz. Funkce frekvenčně závislého režimu je blokována do 15. sekundy simulace (čas aktivace funkce). Funkce frekvenčně závislého režimu při nadfrekvenci má nastavení totožné s nastavením funkce během simulace odezvy ve frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci: mez aktivace a deaktivace funkce je 50,2 Hz, časová odezva při skokové změně frekvence je 0 s, časová prodleva po podkročení meze deaktivace je 0 s, časová konstanta funkce je 0,01 s. Funkce frekvenčně závislého režimu při podfrekvenci má nastavení totožné s nastavením funkce během simulace odezvy ve frekvenčně závislém režimu při podfrekvenci: mez aktivace a deaktivace funkce je 49,8 Hz, časová odezva při skokové změně

frekvence je 0 s, časová prodleva po překročení meze deaktivace je 0 s, časová konstanta funkce je 0,01 s. Počáteční prodleva byla zkrácena na 20 s, což je dostatečná doba pro najetí a ustálení zdrojů v rámci zvolených nastavení a časová prodleva TPR byla zkrácena na 10 s. Pro **test 1/1** je výchozí a žádaný výkon zdroje hodnota $P_{\max} = 25 \text{ kW}$. Požadovaná hodnota jalového výkonu je ve variantách testu 1/1 různá. Pro **test 1/1a** je hodnota žádaného jalového výkonu $-12,11 \text{ kVAr}$ (Q_{\min}), zatímco pro **test 1/1b** je hodnota žádaného jalového výkonu $12,11 \text{ kVAr}$ (Q_{\max}) a pro **test 1/1c** je hodnota žádaného jalového výkonu nulová. Pro ilustraci výsledků simulací testů 1 jsou uvedeny souhrnně průběhy pro testy 1/1a, 1/1b a 1/1c.

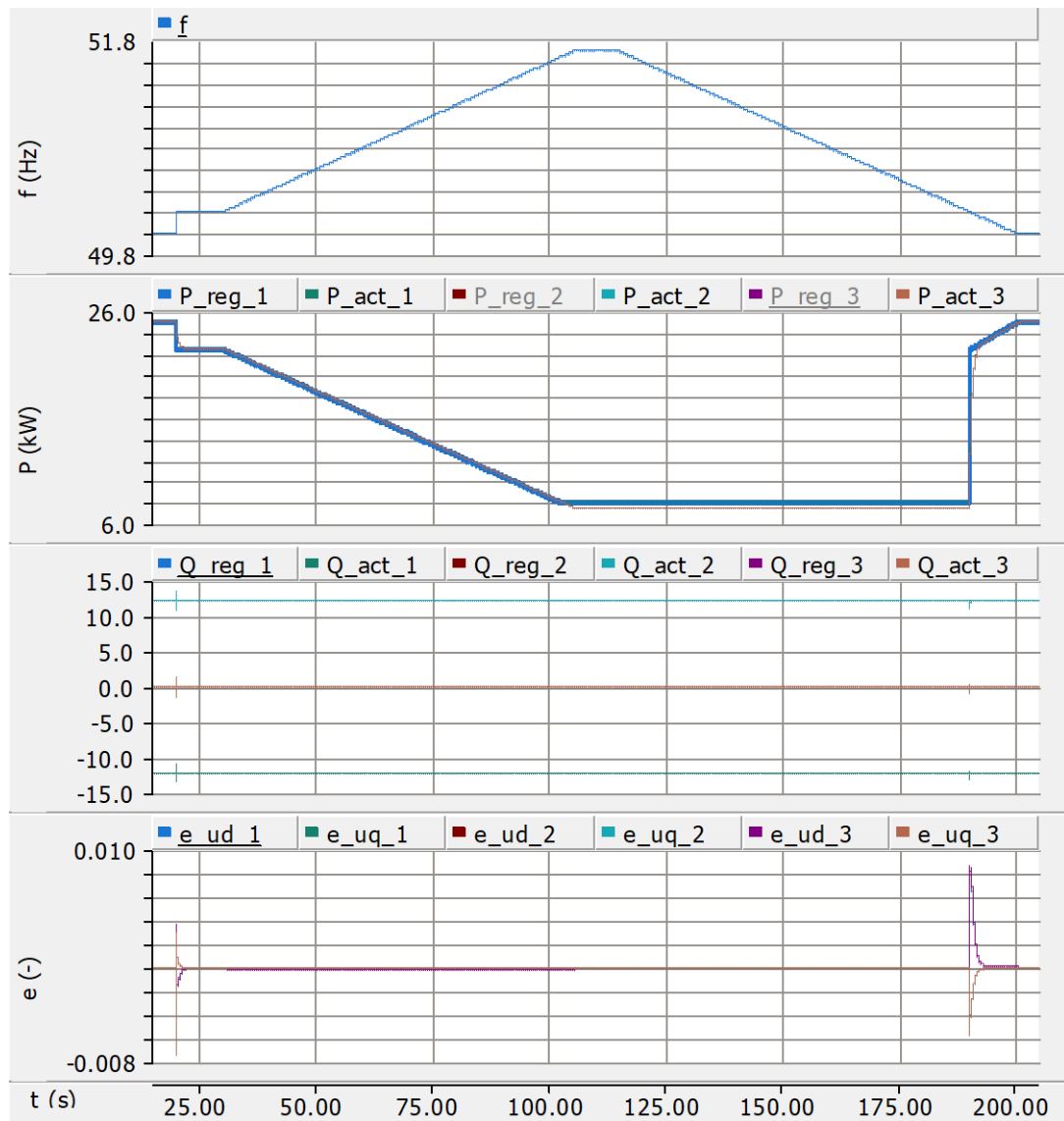
Pro **test 1/2** je výchozí a žádaný výkon zdroje hodnota minimální regulační úrovně -8 kW . Žádaná hodnota jalového výkonu je tak pro **test 1/2a** $-3,785 \text{ kVAr}$ (Q_{\min}), zatímco pro **test 1/2b** $3,785 \text{ kVAr}$ (Q_{\max}) a pro **test 1/2c** nulová. Pro ilustraci výsledků simulací testů 1 jsou uvedeny souhrnně průběhy pro testy 1/2a, 1/2b a 1/2c.

Je důležité uvést, že tyto simulace neřeší (v rámci vytvořené filozofie modelů v rámci této práce) provoz zdroje v režimu master, kdy VM stejně jako v testech postulovaných v této kapitole odregulovává odchylku frekvence změnou činného výkonu. V případě práce zdroje v režimu master je regulační obvod řídicího systému VM řešen jinak, než je tomu v režimu slave, ač jsou regulační veličiny pro odregulování odchylky frekvence v podstatě totožné. Simulace provozu zdroje v režimu master řeší simulace provedené v rámci kapitoly 11.2.2.

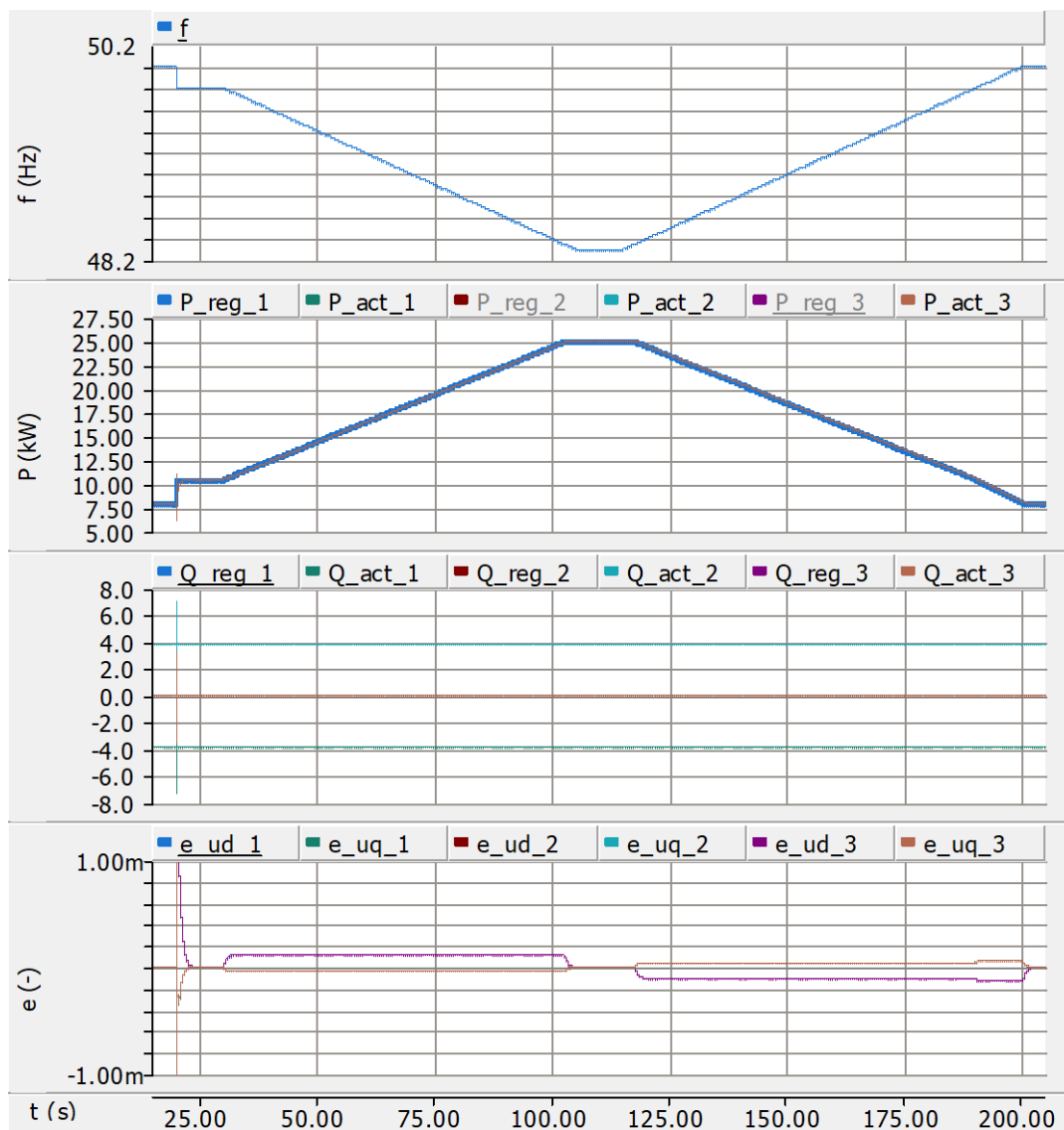
Provedení simulací

Simulace byly provedeny pro tři různá nastavení parametrů regulačního obvodu. Konkrétní nastavení lze dohledat přímo v nastavení modelů VM v souboru SMe06U.pscx a konkrétní simulace lze revidovat změnou stavu vrstvy a přepínače vztahující se ke konkrétnímu testu. Grafy na obr. 11-32 a obr. 11-33 znázorňují průběhy sledovaných veličin pro testy 1/1a, 1/1b, 1/1c, 1/2a, 1/2b a 1/2c (souhrnně po trojicích).

Pozn.: Průběhy skutečných činných výkonů (P_{act}) a regulačních odchylek (e_{ud}) zdrojů se v a překrývají.



obr. 11-32: SMe06U – test 1/1a, 1/1b a 1/1c



obr. 11-33: SMe06U – test 1/2a, 1/2b a 1/2c

11.1.7 Simulace schopnosti dodávat jalový výkon (Reactive Power Capability)

Projekty pro simulace: SMe07U.pscx, SMe07IBG.pscx a SMe07SG.pscx.

Simulace byly sestaveny podle požadavků metodiky ověření souladu s požadavky RfG pro výrobní moduly typu C a D [50]. Cíle simulace jsou uvedeny v kapitole Simulace schopnosti dodávat jalový výkon (Reactive Power Capability), která je součástí kapitoly 3.1.5.

Výchozí stav simulace je dodávka určitého výkonu VM do sítě. Dodávaný činný výkon odpovídá jednomu z definovaných výkonů – P_{\max} , P_{\min} , $P_{\text{stř}}$, případně jiný, specifikovaný certifikátorem či provozovatelem PS. Provoz soustavy, do níž VM pracuje, odpovídá běžnému stavu, napětí v místě připojení VM k ES odpovídá jedné z definovaných hodnot – $0,875 U_n$, $1 U_n$, $1,1 U_n$, případně jiné, specifikované certifikátorem či provozovatelem PS.

Sledované veličiny jsou skutečný činný výkon VM (P_{skut}), skutečný jalový výkon VM (Q_{skut}) a napětí v místě připojení VM k ES (U_p). Zaznamenává se jejich časový průběh během simulovaných stavů.

V **testu 1** je ověřováno **dosažení stanovených mezí jalového výkonu**. Simulace jsou provedeny na výkonových hladinách P_{\max} , P_{\min} a $P_{\text{stř}}$. Pro SVM odpovídá hodnota P_{\max} maximální

kapacitě VM, pro NVM výkonu nad 60 % maximální kapacity VM. Pro SVM odpovídá hodnota P_{\min} minimální regulační úrovni VM, pro NVM výkonu v rozmezí 10 až 20 % maximální kapacity VM. Pro SVM odpovídá hodnota $P_{\text{stř}}$ pracovnímu bodu činného výkonu VM mezi P_{\min} a P_{\max} , pro NVM výkonu v rozmezí 30 až 50 % maximální kapacity VM. Konkrétní hodnoty činného výkonu jsou stanoveny na základě reálných měření v rámci zkoušek souladu. Pro uvedené hladiny činného výkonu je napětí v místě připojení simulováno s velikostí $0,875 U_n$, U_n a $1,1 U_n$ a hladinách dosažených během reálných měření v rámci zkoušek souladu. Pro kombinace požadovaných hodnot činného výkonu a napětí se během simulace provádí plynulá změna jalového výkonu VM v příslušném směru pro oblast podbuzení a přebuzení, až po dosažení mezních hodnot rozsahu jalového výkonu stanovených dle diagramů uvedených v kapitole Simulace schopnosti dodávat jalový výkon (Reactive Power Capability) (strana 86). VM musí být schopný při tomto mezním jalovém výkonu trvale pracovat.

Vyhodnocení je řešeno kontrolou splnění **kritérií** pro splnění požadavků RfG na schopnost VM překlenout poruchu [50]:

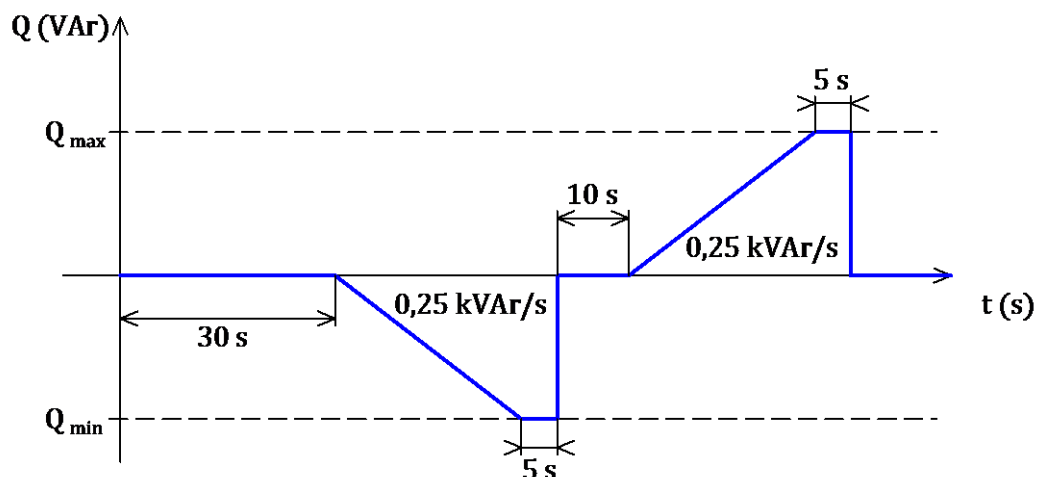
- Výrobní modul musí být schopen dodávat induktivní (v podbuzení) a kapacitní (v přebuzení) jalový výkon o velikosti mezi stanovené obalové křivky U - Q/P_{\max} (dle příslušného diagramu).
- Výrobní modul musí být schopen v přiměřených lhůtách přejít do kteréhokoliv pracovního bodu v rámci stanoveného profilu obalové křivky U - Q/P_{\max} (dle příslušného diagramu).

Popis simulací

Nominální výkon všech modelů zdrojů byl zvolen 25 kW při nominálním napětí v místě připojení 0,4 kV. Zdroje pracují s deaktivovaným blokem ochran. Minimální regulační úroveň VM je 5 kW.

Test 1 je rozdělen na tři části podle požadované velikosti činného výkonu dodávaného VM do sítě. Každá část je dále rozdělena na další tři části podle napětí v místě připojení VM. Skupiny simulací v rámci výkonů jsou $P_{\max} = 25$ kW, $P_{\text{stř}} = 15$ kW a $P_{\min} = 5$ kW. Skupiny simulací v rámci napětí jsou $0,875 U_n$, $1 U_n$, $1,1 U_n$. Vzhledem k tomu, že v metodice není uveden trend změny požadovaného jalového výkonu VM, byl zvolen trend $0,01 Q/P_{\max}/s$. To, při hodnotě $P_{\max} = 25$ kW odpovídá trendu $0,25$ kVar/s. Průběh požadované hodnoty jalového výkonu VM je ilustrována na obr. 11-34. Hodnota Q_{\min} , která reprezentuje maximální hodnotu podbuzení, odpovídá pro SVM hodnotě $-0,475 Q/P_{\max}$ ($-11,875$ kVar), resp. pro NVM $-0,375 Q/P_{\max}$ ($-9,375$ kVar). Hodnota Q_{\max} , která reprezentuje maximální hodnotu přebuzení, odpovídá pro SVM hodnotě $0,475 Q/P_{\max}$ ($11,875$ kVar), resp. pro NVM $0,375 Q/P_{\max}$ ($9,375$ kVar). To, jestli v daném testu bude dosaženo hodnoty Q_{\min} , resp. Q_{\max} závisí na požadavku na jalový výkon dle diagramů pracovních oblastí uvedených v kapitole Simulace schopnosti dodávat jalový výkon (Reactive Power Capability) (strana 86). Pro SVM, při výkonech nižších než maximálních, klade metodika požadavek na schopnost provozu ve kterémkoliv možném pracovním bodě v rámci P-Q diagramu SVM (přínejmenším do dosažení minimální úrovně stabilního provozu). Proto, pro jednoduchost a názornost v rámci prováděných simulací, byly zvoleny krajní body P-Q diagramu pro střední výkon (15 kW) i minimální výkon (5 kW) $-12,5$ kVar pro maximální mez podbuzení a $12,5$ kVar pro maximální mez přebuzení SVM. (Podrobné studium pracovní oblasti synchronního generátoru není předmětem studie v rámci těchto simulací, proto byly zvoleny hodnoty jalových výkonů, které by mohli u reálného SG odpovídat krajním mezím jalových výkonů pro dané činné výkony, s ohledem na oteplení čelních konstrukcí statoru a mez statické stability (- pro oblast podbuzení) a oteplení budícím proudem (- pro oblast přebuzení).) Po dosažení maximální hodnoty

podbuzení následuje 5s prodleva pro ustálení hodnoty jalového výkonu, po které následuje skok na nulovou žádanou hodnotu jalového výkonu, 10s prodleva a trend směrem k maximální hodnotě přebuzení, po jejímž dosažení následuje opět 5s prodleva a skok na nulovou žádanou hodnotu jalového výkonu. Z důvodu požadavků na skokové změny jalového výkonu je nutné během daných simulací nastavit rampu změny jalových výkonu na hodnoty, které budou mít minoritní vliv na žádané skokové změny – byla zvolena rampa 100 kVAr/s. V tab. 11-4 je uvedeno rozdělení simulací v rámci testu 1 a jsou zde uvedeny mezní hodnoty žádaných jalových výkonů pro jednotlivé typy VM.



obr. 11-34: Časový průběh simulované změny žádané hodnoty jalového výkonu

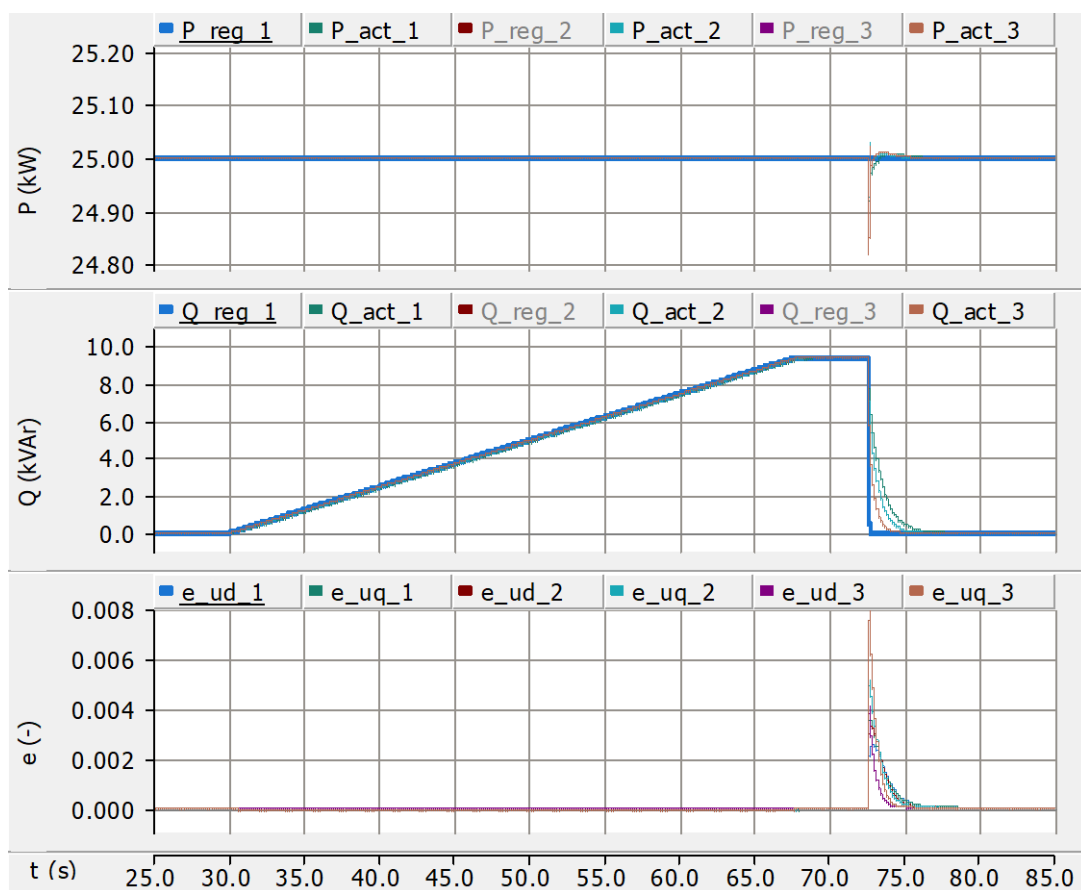
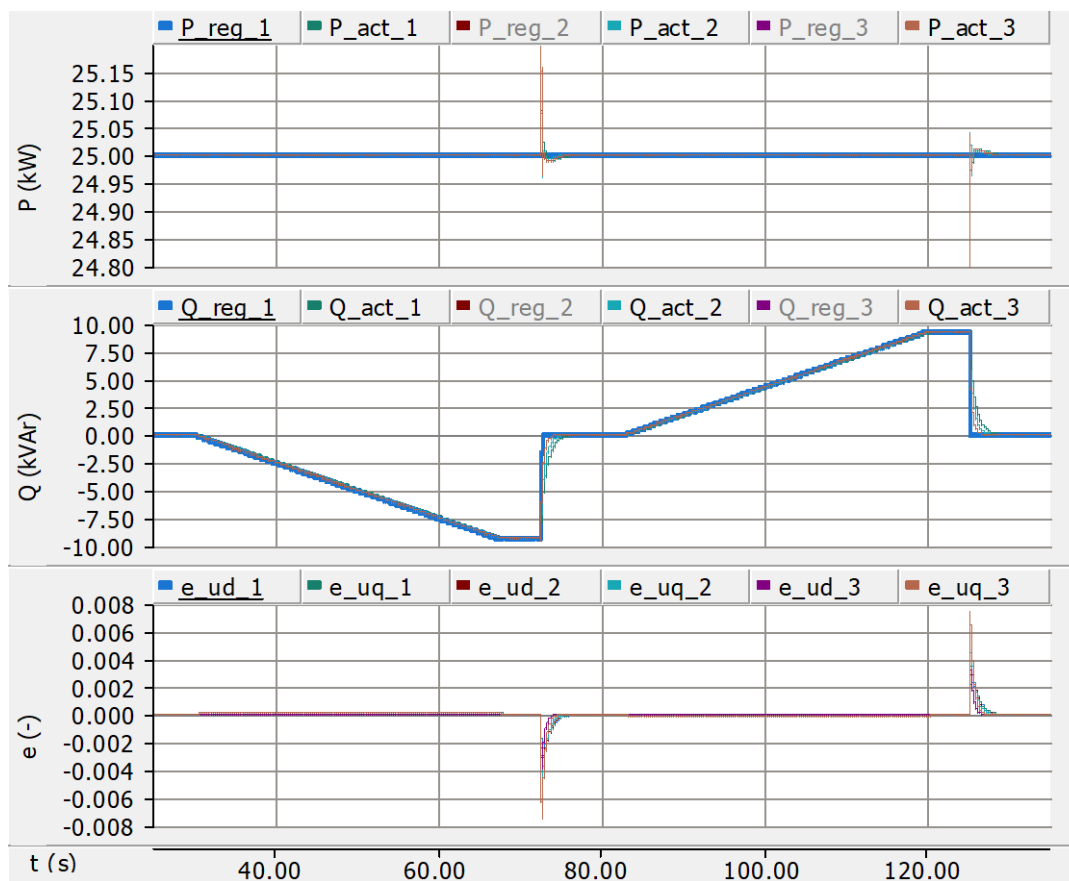
tab. 11-4: Rozdělení simulací a mezní hodnoty jalového výkonu pro simulace schopnosti dodávat jalový výkon

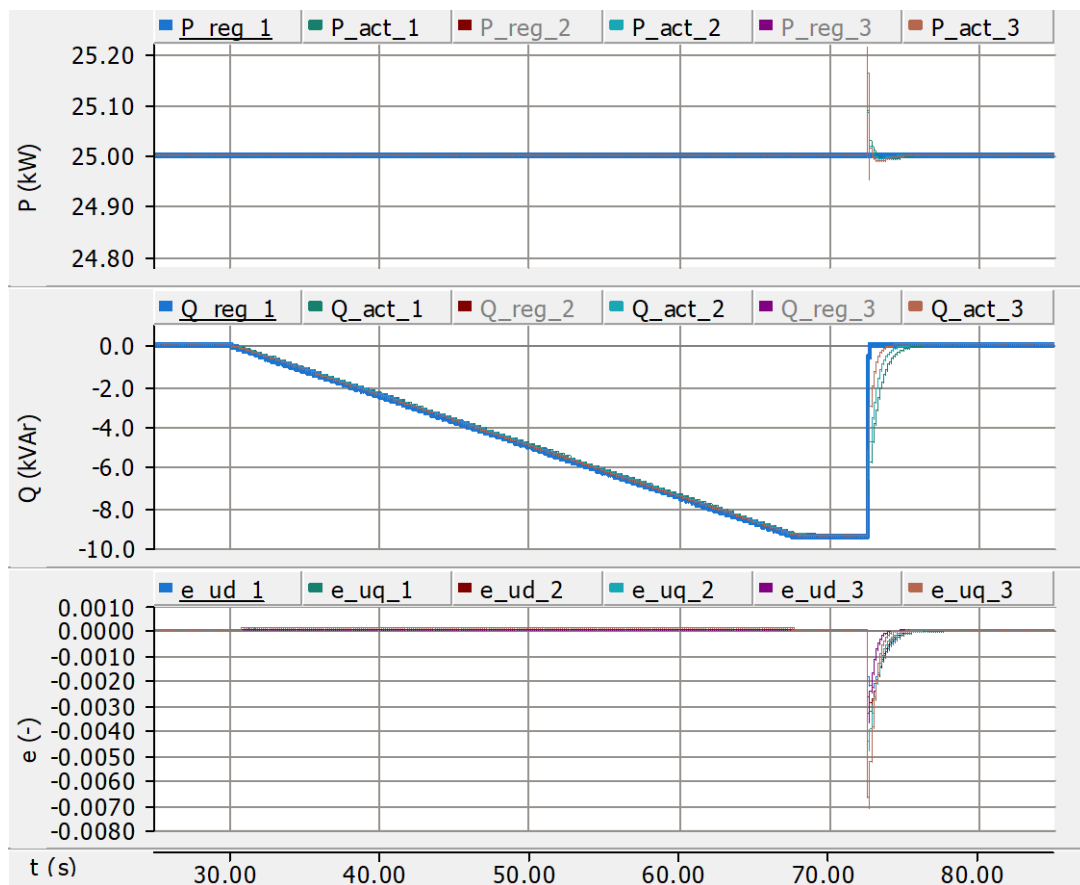
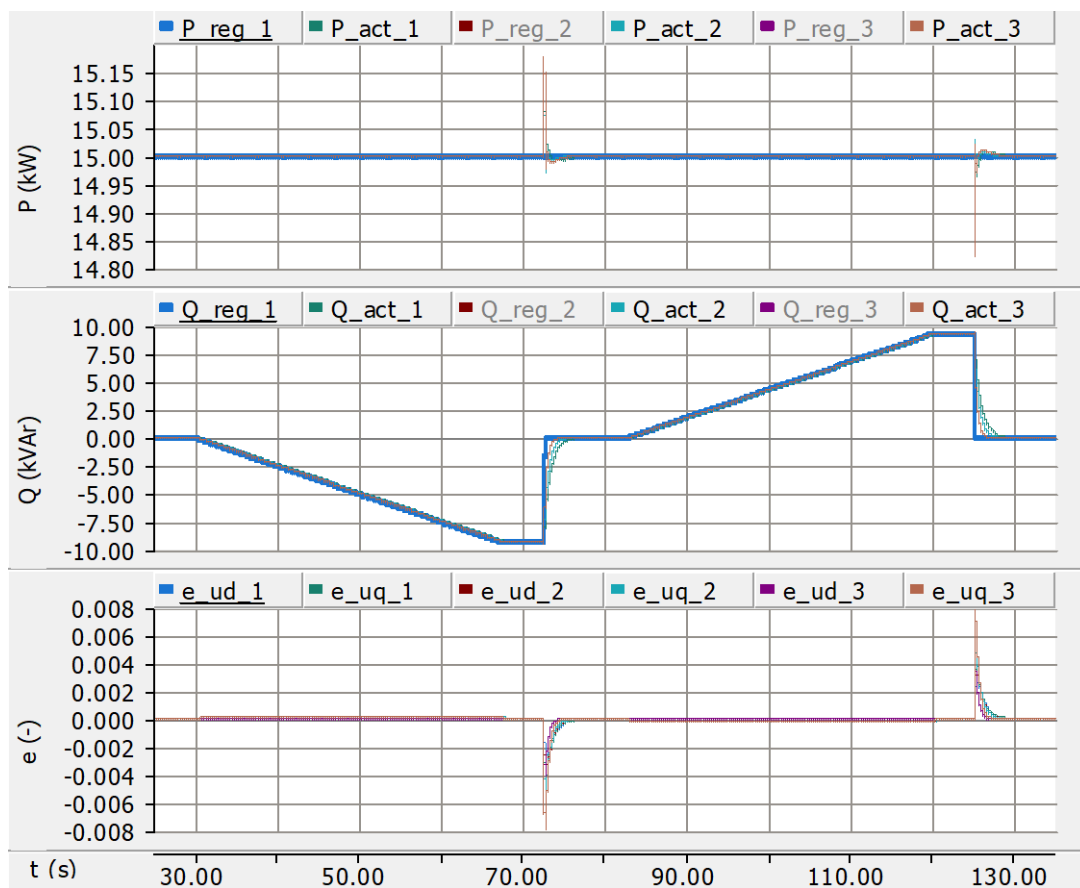
test	P (kW)	U_p (p.j.)	SVM		NVM	
			Q_{\min} (kVAr)	Q_{\max} (kVAr)	Q_{\min} (kVAr)	Q_{\max} (kVAr)
1/1a	25	0,875	0	11,875	0	9,375
1/1b	25	1,000	-11,875	11,875	-9,375	9,375
1/1c	25	1,100	-11,875	0	-9,375	0
1/2a	15	0,875	-12,500	12,500	-9,375	9,375
1/2b	15	1,000	-12,500	12,500	-9,375	9,375
1/2c	15	1,100	-12,500	12,500	-9,375	9,375
1/3a	5	0,875	-12,500	12,500	-9,375	9,375
1/3b	5	1,000	-12,500	12,500	-9,375	9,375
1/3c	5	1,100	-12,500	12,500	-9,375	9,375

Provedení simulací

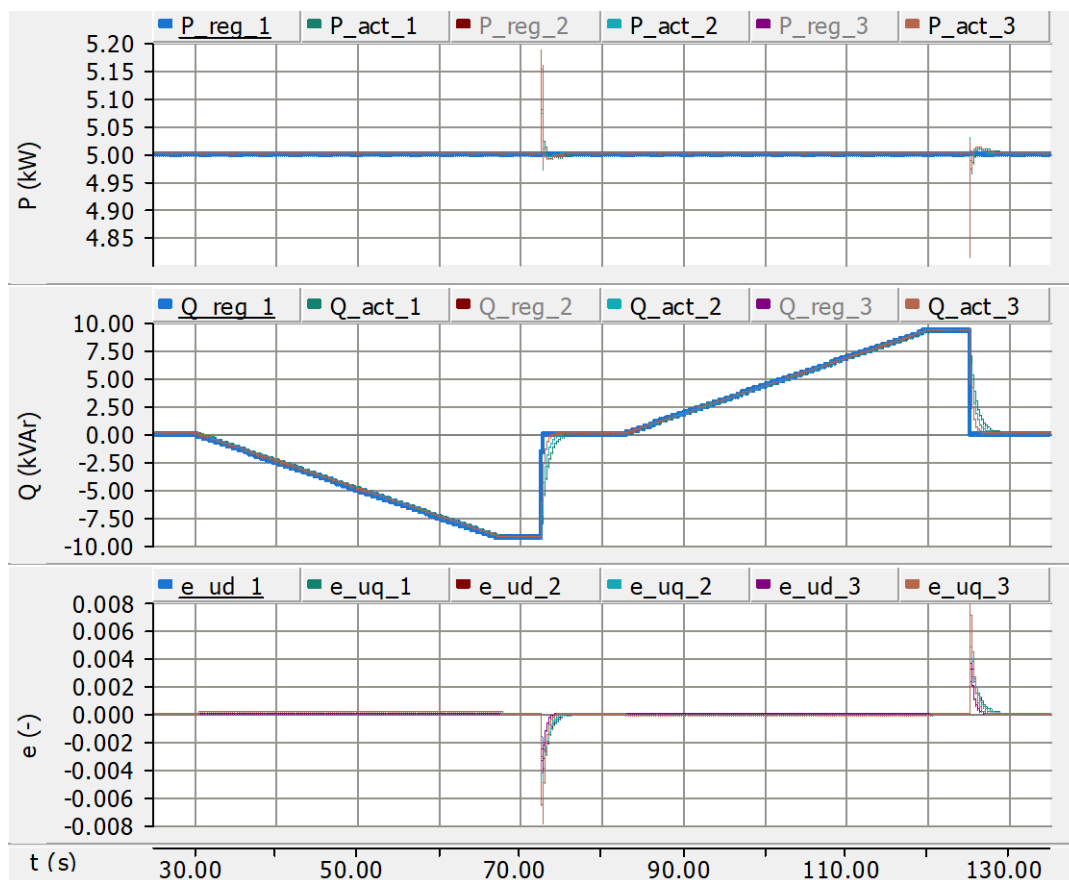
Simulace byly provedeny pro tři různá nastavení parametrů regulačního obvodu. Konkrétní nastavení lze dohledat přímo v nastavení modelů VM v souboru SME07U.pscx a konkrétní simulace lze revidovat změnou stavu vrstvy a přepínače vztahující se ke konkrétnímu testu. Grafy na obr. 11-35 až obr. 11-39 znázorňují průběhy sledovaných veličin pro testy 1/1a, 1/1b, 1/1c, 1/2a a 1/3a. Ač je napětí v místě připojení – U_p sledovanou veličinou, není ve zde uvedených grafech znázorněna. Její hodnota je vždy konstantní pro celý průběh simulace.

Všechny simulované průběhy splňují kritéria simulace schopnosti dodávat jalový výkon.

obr. 11-35: SMe07U – test 1/1a ($U_p = 0,875 U_n$)obr. 11-36: SMe07U – test 1/1b ($U_p = U_n$)

obr. 11-37: SMe07U – test 1/1c ($U_p = 1,1 U_n$)obr. 11-38: SMe07U – test 1/2a ($U_p = 0,875 U_n$)

Průběhy sledovaných veličin pro testy 1/2b (pro $U_p = U_n$) a 1/2c (pro $U_p = 1,1 U_n$) jsou v daném rozlišení uvedeném v této práci totožné s průběhy na obr. 11-38.



obr. 11-39: SMe07U – test 1/3a ($U_p = 0,875 U_n$)

Průběhy sledovaných veličin pro testy 1/3b (pro $U_p = U_n$) a 1/3c (pro $U_p = 1,1 U_n$) jsou v daném rozlišení uvedeném v této práci totožné s průběhy na obr. 11-39.

11.1.8 Simulace dodávky rychlého poruchového proudu (Fast Fault Current)

Projekty pro simulace: SMe08U.pscx a SMe08IBG.pscx.

Simulace byly sestaveny podle požadavků metodiky ověření souladu s požadavky RfG pro výrobní moduly typu C a D [50]. Cíle simulace jsou uvedeny v kapitole Simulace dodávky rychlého poruchového proudu (Fast Fault Current), která je součástí kapitoly 3.1.5, strana 88.

Simulace jsou určeny pro NVM, které musí být schopny aktivovat dodávku rychlého poruchového proudu zajištěním rychlého poruchového proudu v místě připojení nebo měřením odchylek napětí na svorkách jednotlivých bloků NVM a dodáním rychlého poruchového proudu na svorky těchto bloků. Poruchový proud je charakterizován vztahem dle rovnice 11.2.

$$Di = k \cdot Du \quad (11.2)$$

kde Di (%) je příspěvek okamžité hodnoty proudu; k (-) je koeficient, vyjadřující dosah proudu jalového charakteru (závislý především na U_k transformátoru); Du (%) je odchylka napětí od jmenovité hodnoty.

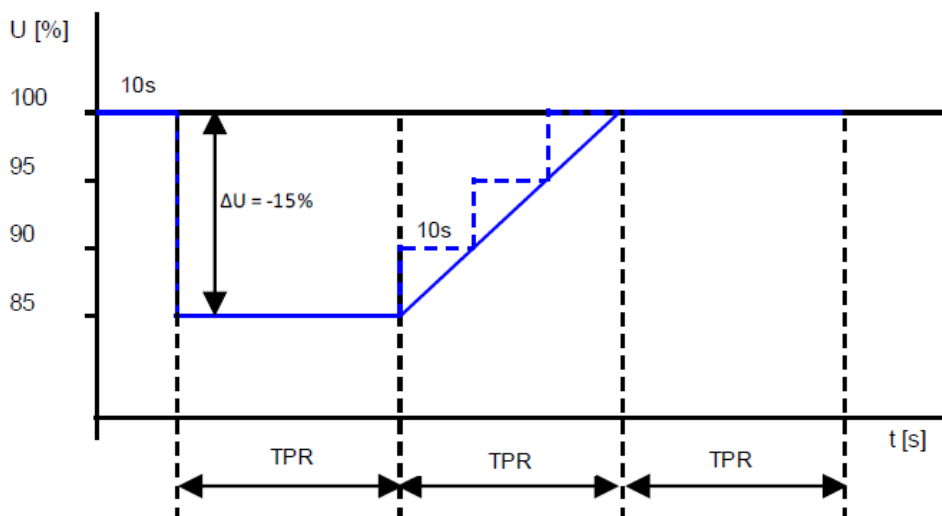
Porucha iniciující dodávku rychlého poruchového proudu je identifikována při $U < 0,9 U_n$ nebo $U > 1,1 U_n$, pro konec poruchy platí $0,9 U_n < U < 1,1 U_n$. Koeficient k nabývá hodnoty 2 až 6.

Výchozím stavem simulace je stav, kdy je VM připojen k soustavě a pracuje ve stanoveném pracovním bodě před poruchou dle P - Q diagramu. Tzn. na jedné z definovaných hladin činného výkonu (P_{\max} , P_{\min} a $P_{\text{stř}}$, příp. jiné hladině výkonu specifikované certifikátorem, resp. provozovatelem soustavy) a na jedné z definovaných hodnot jalového výkonu v oblasti podbuzení a přebuzení (Q_{\min} , Q_{\max} , příp. jiné hodnotě specifikované certifikátorem, resp. provozovatelem PS). Provoz soustavy odpovídá běžnému stavu před simulovanou poruchou. Napětí v místě připojení výrobního modulu k ES je nastaveno na hodnotu $1 U_n$ (p.j.). Koeficient k je nastaven na hodnotu odpovídající charakteru skutečnému připojení VM k soustavě. Simulace začíná z ustáleného stavu a test se provádí simulací poruchy na základě změny hodnoty napětí v místě připojení s návratem na výchozí hodnotu napětí.

Sledované veličiny jsou činný výkon VM (P_{skut}), jalový výkon v místě připojení VM k ES (Q_{skut}), napětí v místě připojení VM k ES (U_p), proud v místě připojení VM k ES (I_p), případně napětí na svorkách jednotlivých bloků VM (U_{sv}) a proud na svorkách jednotlivých bloků VM (I_{sv}).

V testu 1 je sledována odezva na skokovou změnu napětí. Zaznamenáván je časový průběh sledovaných veličin jako odezva na definovanou simulovanou změnu napětí v místě připojení VM k ES. Testovací signál je tvořen skokovou změnou napětí ve směru jeho snížení (příp. i zvýšení) z výchozí hodnoty o velikost potřebnou k identifikaci poruchy ($\Delta U = 15\%$). Výchozí hladina napětí v místě připojení VM pro provádění testu vztažená k referenčnímu napětí je na hodnotě odpovídající $1 U_n$ (p.j.). Vlastní simulace napětí se provádí na výkonových hladinách P_{\max} (nad $60\% P_{\max}$), P_{\min} (10 až $20\% P_{\max}$), $P_{\text{stř}}$ (30 až $50\% P_{\max}$) v místě připojení. Konkrétní hodnoty činného a jalového výkonu pro simulaci jsou stanoveny dle požadavků provozovatele PS. Na uvedených hladinách činného výkonu se simulace provádí vždy pro stanovené hodnoty jalového výkonu v oblasti podbuzení a přebuzení (co nejblíže krajním hodnotám Q_{\min} , Q_{\max}).

Z výchozí hladiny napětí se provede skoková změna napětí na hodnotu $0,85 U_n$ ($\Delta U = -15\%$), po které následuje časová prodleva TPR určená pro ustálení odezvy ($10 \text{ s} \leq \text{TPR} \leq 30 \text{ s}$). Po uplynutí TPR následuje postupná změna napětí zpět na výchozí hodnotu, která může být realizována jako plynulá změna nebo jako posloupnost malých skokových změn napětí (s krokem $\leq 5\%$). Průběh napětí ilustruje obr. 11-40. Následně lze z výchozí hladiny napětí provést stejným způsobem skokovou změnu napětí opačným směrem na hodnotu $1,15 U_n$ ($\Delta U = +15\%$).



obr. 11-40: Časový průběh simulované změny napětí pro FFC [50]

Pro **vyhodnocení** jsou zaznamenány počáteční hodnoty ustáleného stavu měřených veličin a vyhodnotí se časové průběhy měřených veličin. Kontrolovanými **kritérii** jsou:

- VM musí být schopen v případě poruchy (od detekce podpětí/přepětí) aktivovat dodávku/absorbci rychlého poruchového proudu o velikosti odpovídající napětí (dle hodnoty koeficientu k) jako důsledek provedené skokové změny napětí do doby $t_1 \leq 30$ ms a jeho ustálení musí být dosaženo do doby $t_2 \leq 60$ ms s tolerancí ± 5 %.
- VM musí být schopen funkci rychlého poruchového proudu deaktivovat při návratu napětí do mezí $0,9 U_n < U < 1,1 U_n$.

Parametry přesnosti dodávky rychlého poruchového proudu nejsou definovány.

Popis simulací

Nominální výkon všech modelů zdrojů byl zvolen 25 kW při nominálním napětí v místě připojení 0,4 kV. Zdroje pracují s deaktivovaným blokem ochran a deaktivovanými výkonovými křivkami. Funkce uvolnění poruchové proudu je aktivní, s nastavenými prahovými hodnotami $0,9 U_n$, resp. $1,1 U_n$. Výkonová hladina P_{\max} je 25 kW (100 % P_{\max}) Minimální regulační úroveň – P_{\min} je 5 kW (20 % P_{\max}) a střední výkon – $P_{\text{stř}}$ je 12,5 kW (50 % P_{\max}). Stav maximálního podbuzení a přebuzení odpovídá vždy účinníku 0,9.

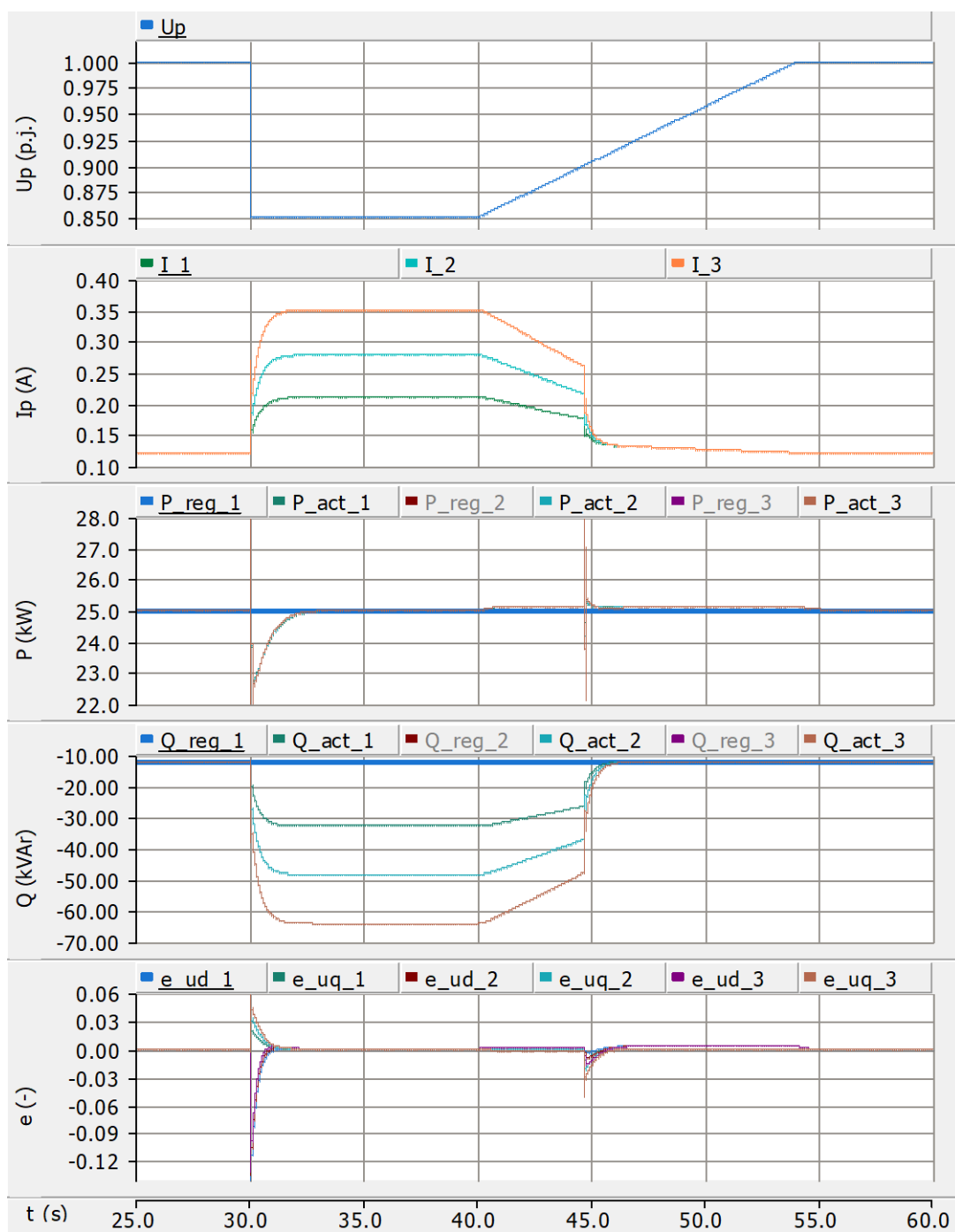
Test 1 je rozdělen do bodů *a* až *f*, dle kombinace výchozí a žádané hodnoty činného a jalového výkonu zdroje. Kombinace testu 1 uvádí tab. 11-5. Počáteční prodleva testu je 30 s, čas TPR pro pokles průběhu napětí na obr. 11-40 je 10 s a čas zotavení napětí 24 s.

tab. 11-5: Kombinace výchozích a žádaných hodnot činného a jalového výkonu pro simulace schopnosti dodávky rychlého poruchového proudu

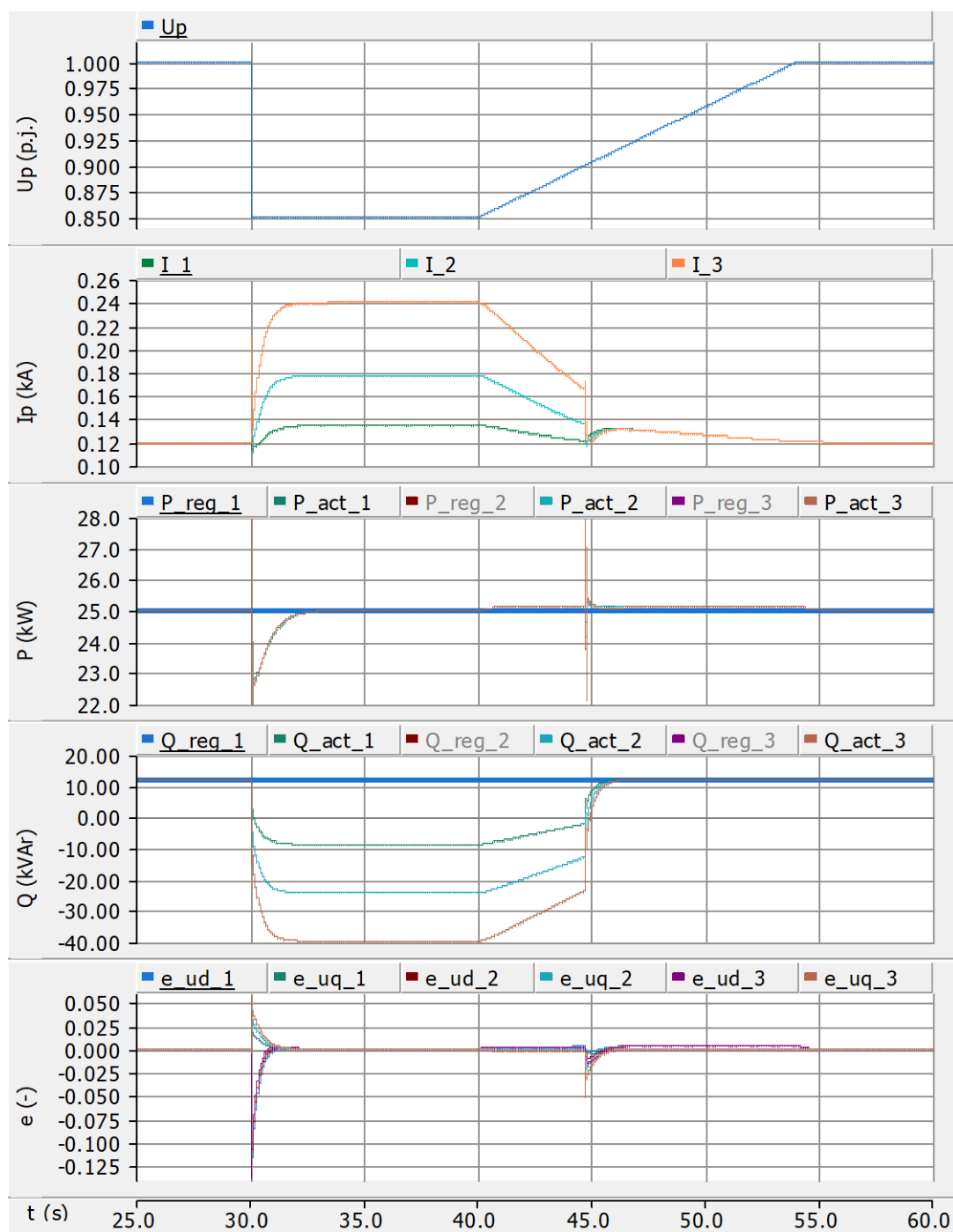
test 1	P (kW)	Q (kVAr)
a	25,0	-12,11
b	25,0	12,11
c	5,0	-2,42
d	5,0	2,42
e	12,5	-6,05
f	12,5	6,05

Provedení simulací

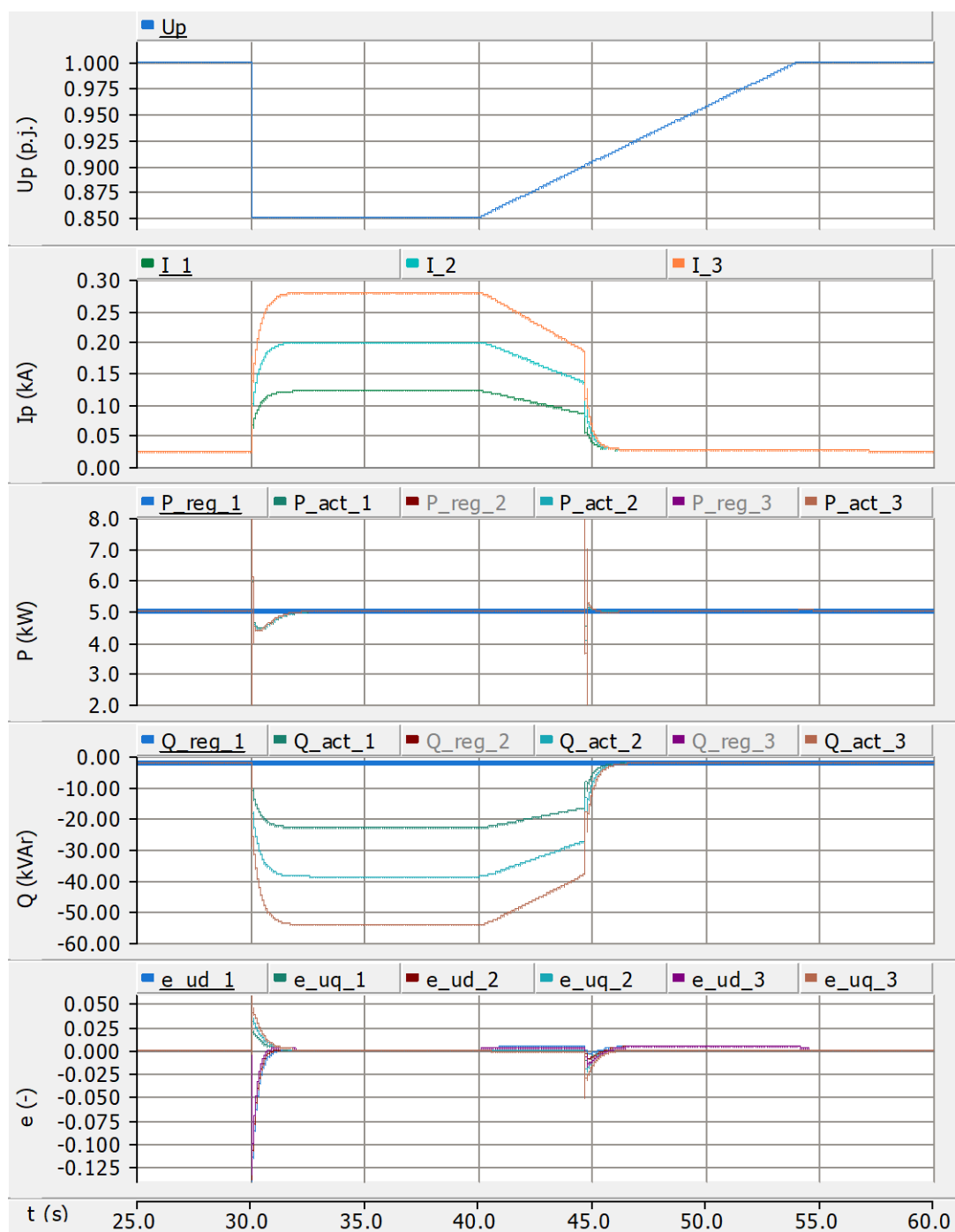
Simulace byly provedeny pro tři různá nastavení koeficientu k vyjadřujícího dosah proudu jalového charakteru – 2, 3,5 a 5. Parametry regulačních obvodů jsou pro všechny VM stejné. Konkrétní nastavení lze dohledat přímo v nastavení modelů VM v souboru SMe08U.pscx a konkrétní simulace lze revidovat změnou stavu vrstvy a přepínače vztahující se ke konkrétnímu testu. Grafy na obr. 11-41 až obr. 11-46 znázorňují průběhy sledovaných veličin pro testy 1a až 1f.



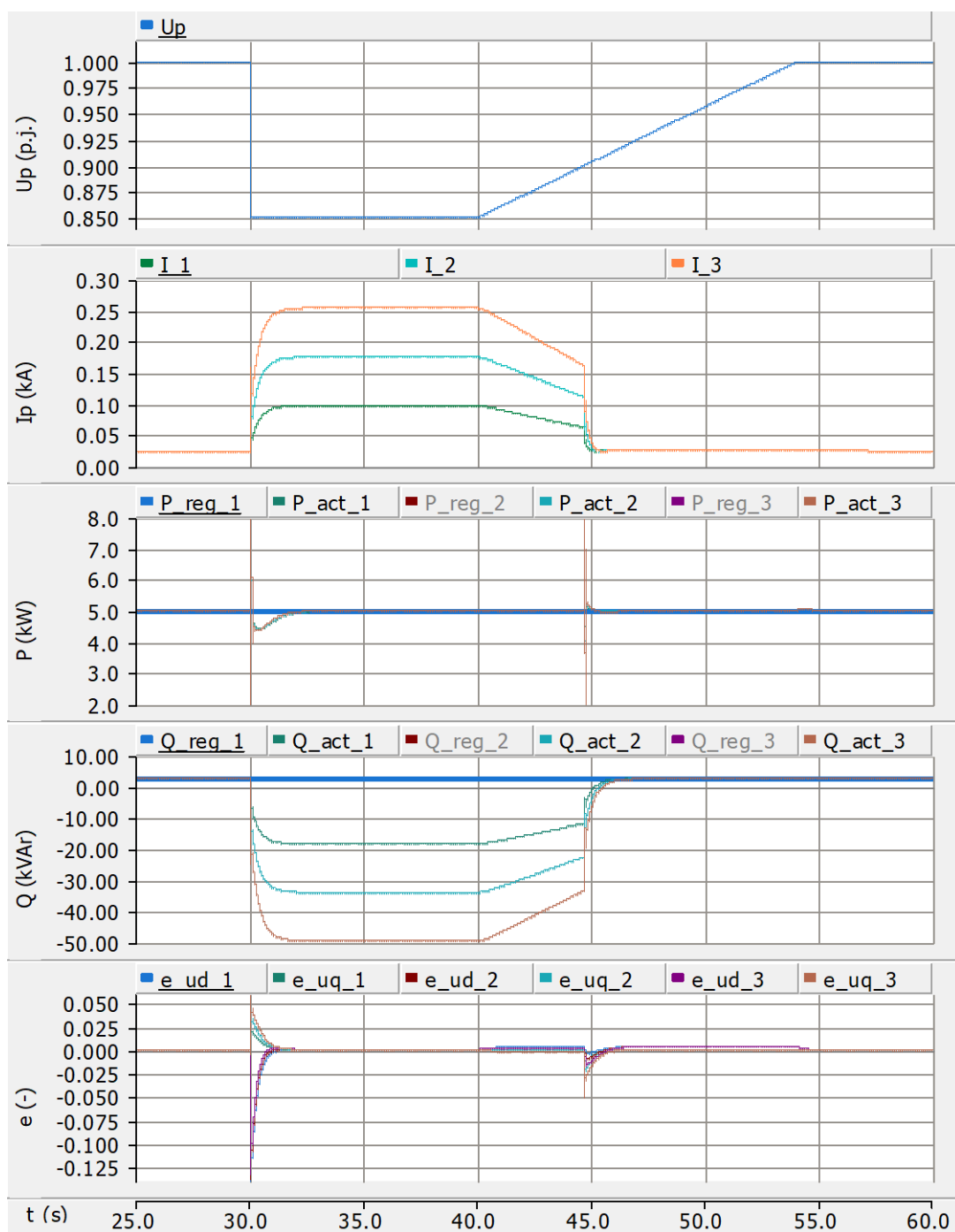
obr. 11-41: SMe08U – test 1a



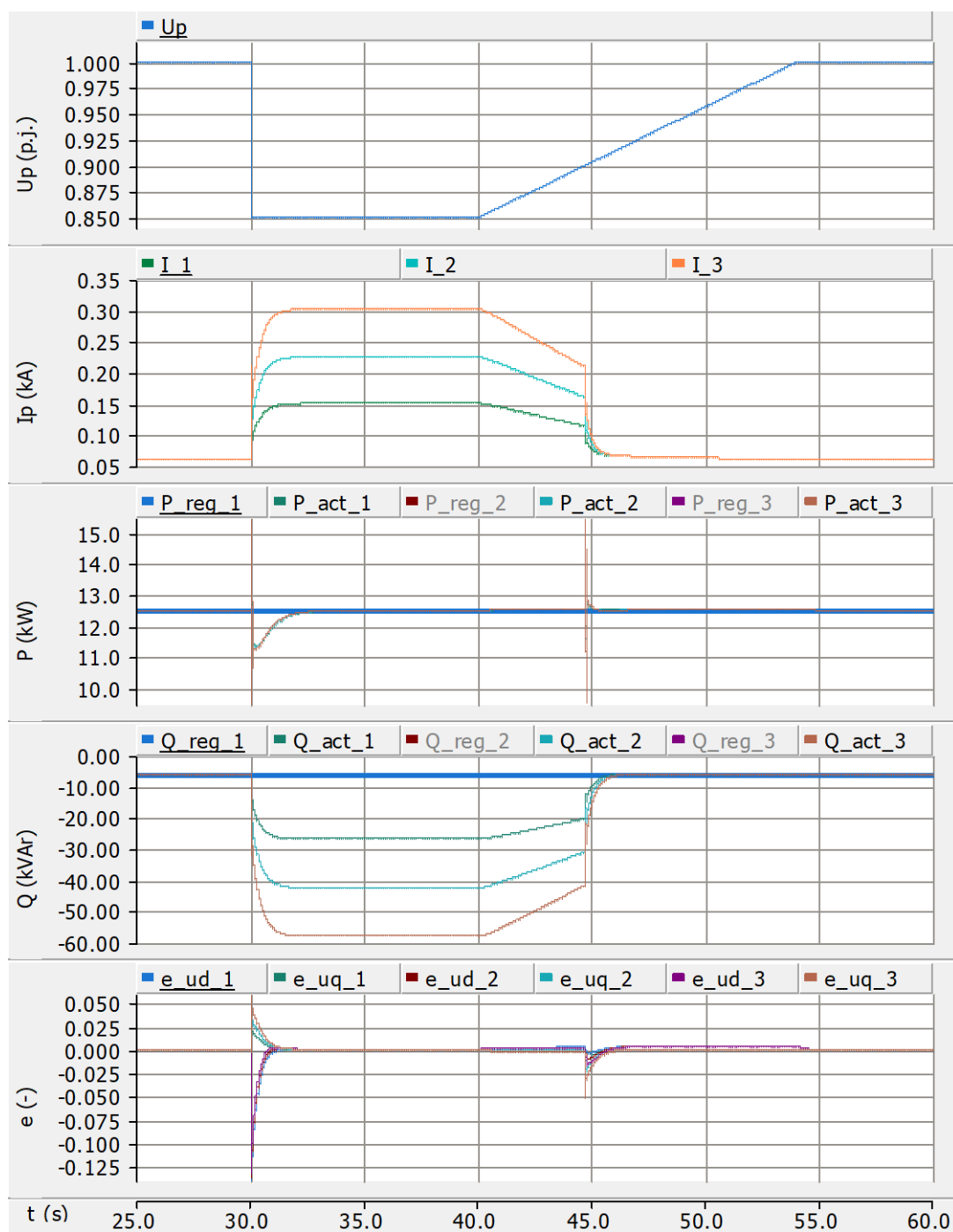
obr. 11-42: SMe08U – test 1b



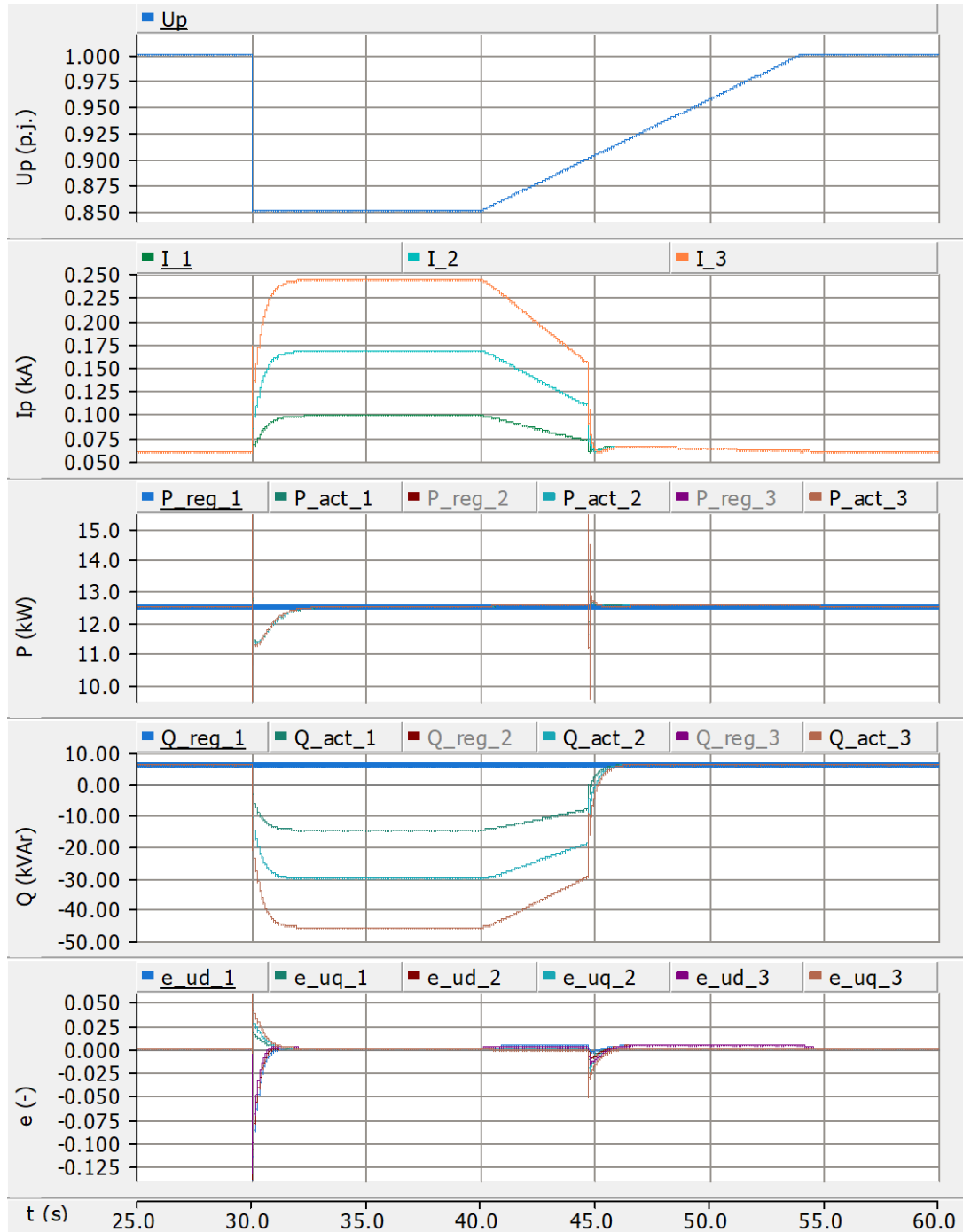
obr. 11-43: SMe08U – test 1c



obr. 11-44: SMe08U – test 1d



obr. 11-45: SMe08U – test 1e



obr. 11-46: SMe08U – test 1f

11.1.9 Simulace schopnosti zajišťovat umělou setrvačnost (Synthetic Inertia)

Projekty pro simulace: SMe09U.pscx a SMe09IBG.pscx.

Simulace byly sestaveny podle požadavků metodiky ověření souladu s požadavky RfG pro výrobní moduly typu C a D [50]. Cíle simulace jsou uvedeny v kapitole Simulace schopnosti zajišťovat umělou setrvačnost (Synthetic Inertia), která je součástí kapitoly 3.1.5, strana 88.

Změna činného výkonu pro umělou setrvačnost je dána vztahem dle rovnice 11.3.

$$\Delta P_i = \frac{2H}{f_n} \cdot \frac{d\Delta f}{dt} \quad (11.3)$$

kde ΔP_i (%) je změna činného výkonu pro umělou setrvačnost; f_n (Hz) je jmenovitá frekvence v soustavě; H (s) je setrvačnost; $d\Delta f/dt$ (Hz/s) je rychlost změny odchylky frekvence v soustavě. Hodnota setrvačnosti H je nastavitelná plynule nebo po krocích maximálně 1 s v rozsahu 2 až 6 s.

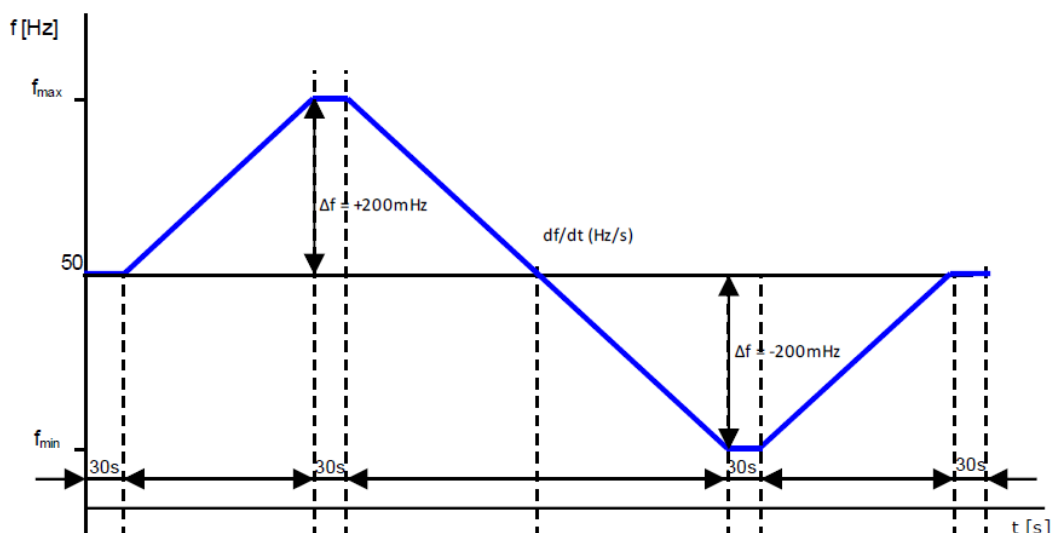
Výchozím stavem simulace je stav, kdy je připojen k soustavě a pracuje na jedné z definovaných hladin činného výkonu (P_{\max} a P_{\min} , případně jiné hladině výkonu specifikované certifikátorem, resp. provozovatelem soustavy). Provoz soustavy odpovídá běžnému stavu, napětí v místě připojení výrobního modulu k ES nastaveno na hodnotu $1 U_n$ (p.j.). Simulace začíná z ustáleného stavu. Test se provádí pro různá nastavení velikosti umělé setrvačnosti H (hodnoty jsou stanoveny certifikátorem, resp. provozovatelem soustavy). Režim FSM a funkce umělé setrvačnosti jsou aktivní.

Sledované veličiny jsou činný výkon (P_{skut}) a simulovaná frekvence na vstupu do regulátoru (f).

V **testu 1** je sledována **odezva na změnu frekvence definované rychlosti**. Test je podobný testu 2 simulace odezvy ve frekvenčně závislém režimu. Rozdíl je v trendu změny frekvence. Pro různě rychlé plynulé změny frekvence definované velikosti a nastavenou hodnotu setrvačnosti H se ověří změna činného výkonu pro umělou setrvačnost v čase. Zaznamenává se časový průběh sledovaných veličin jako odezva na změnu simulované frekvence na vstupu příslušného regulátoru simulačního modelu VM. Testovací signál je tvořen lineární kontinuální změnou frekvence definované rychlosti $d\Delta f/dt$ (Hz/s) z výchozí hodnoty 50 Hz směrem k hodnotám f_{\max} a f_{\min} (maximální velikost $\Delta f = \pm 200$ mHz, příp. jiné velikosti stanovené certifikátorem, resp. Provozovatelem soustavy). Test se provádí pro různé velikosti rychlosti změny frekvence (v rozmezí 0,05 Hz/s až 0,5 Hz/s).

Vlastní test se stává z několika simulací realizovaných na P_{\max} a P_{\min} pro různě nastavené hodnoty umělé setrvačnosti H a pro různě velké rychlosti změny simulované frekvence. Výchozí hladina výkonu pro provádění testu se doporučuje pro P_{\max} snížit o velikost ΔP_i ($P_{\max} - \Delta P_i$) a pro P_{\min} zvýšit o velikost ΔP_i ($P_{\min} + \Delta P_i$), aby v průběhu testu nedošlo k překročení hranic regulačního pásma VM.

Z výchozí hladiny výkonu a výchozí hladiny frekvence 50 Hz se začne s prováděním vzestupné lineární kontinuální změny frekvence nastaveným trendem do hodnoty f_{\max} , v jejímž průběhu bude na výstupu VM odpovídající změna výkonu pro umělou setrvačnost $-\Delta P_i$ (dle nastavené hodnoty H a realizované rychlosti změny $d\Delta f/dt$). Po dosažení hodnoty f_{\max} následuje časová prodleva, kdy je nulový trend změny frekvence a změna výkonu pro umělou setrvačnost bude nulová. Po uplynutí TPR se simulovaná frekvence mění stejným trendem sestupně k hodnotě f_{\min} , v jejímž průběhu bude na výstupu VM opačná změna výkonu pro umělou setrvačnost ΔP_i . Po dosažení hodnoty f_{\min} následuje časová prodleva, kdy je trend změny frekvence 0 Hz/s a změna výkonu pro umělou setrvačnost ΔP_i zde bude nulová. Po uplynutí TPR se simulovaná frekvence vrátí stejným způsobem zpět, dokud není dosaženo výchozí hladiny 50 Hz. Požadovaný průběh frekvence ilustruje obr. 11-47.



obr. 11-47: Časový průběh simulované plynulé změny frekvence pro simulaci umělé setrvačnosti [50]

Pro **vyhodnocení** jsou zaznamenány počáteční hodnoty ustáleného stavu měřených veličin a vyhodnotí se časové průběhy měřených veličin. Kontrolovaným **kritériem** je:

- VM musí být schopen v případě velmi rychlých odchylek frekvence zajistit dostatečně rychlou změnu činného výkonu pro zajištění umělé setrvačnosti o velikosti odpovídající rychlosti změny frekvence (dle hodnoty koeficientu H).

Popis simulací

Nominální výkon všech modelů zdrojů byl zvolen 25 kW při nominálním napětí v místě připojení 0,4 kV. Zdroje pracují s deaktivovaným blokem ochrany a deaktivovanými výkonovými křivkami. Funkce umělé setrvačnosti a frekvenčně závislého režimu je aktivní. Metodika neuvádí požadované hodnoty nastavení obou funkcí, proto byly zvoleny následovně. Funkce umělé setrvačnosti pracuje s časovým oknem pro výpočet rychlosti změny frekvence 0,1 s, prahovou hodnotou rychlosti změny frekvence pro iniciaci funkce ($-\beta$) 0,2 Hz/s, zesílením filtru funkce RoCoF 1 a časovou konstantou filtru funkce RoCoF 0,01 s. Pro ověření byly meze pro iniciaci funkce umělé setrvačnosti nastaveny na 50 Hz, což znamená neexistenci necitlivosti výpočtu RoCoF. Funkce frekvenčně závislého režimu má nastaven rozsah rezervy 10 % (2,5 kW), statiku 4 %, necitlivost frekvenční odezvy 0 Hz, pásmo necitlivosti 0,2 Hz a časovou konstantu výstupu 0,001 s.

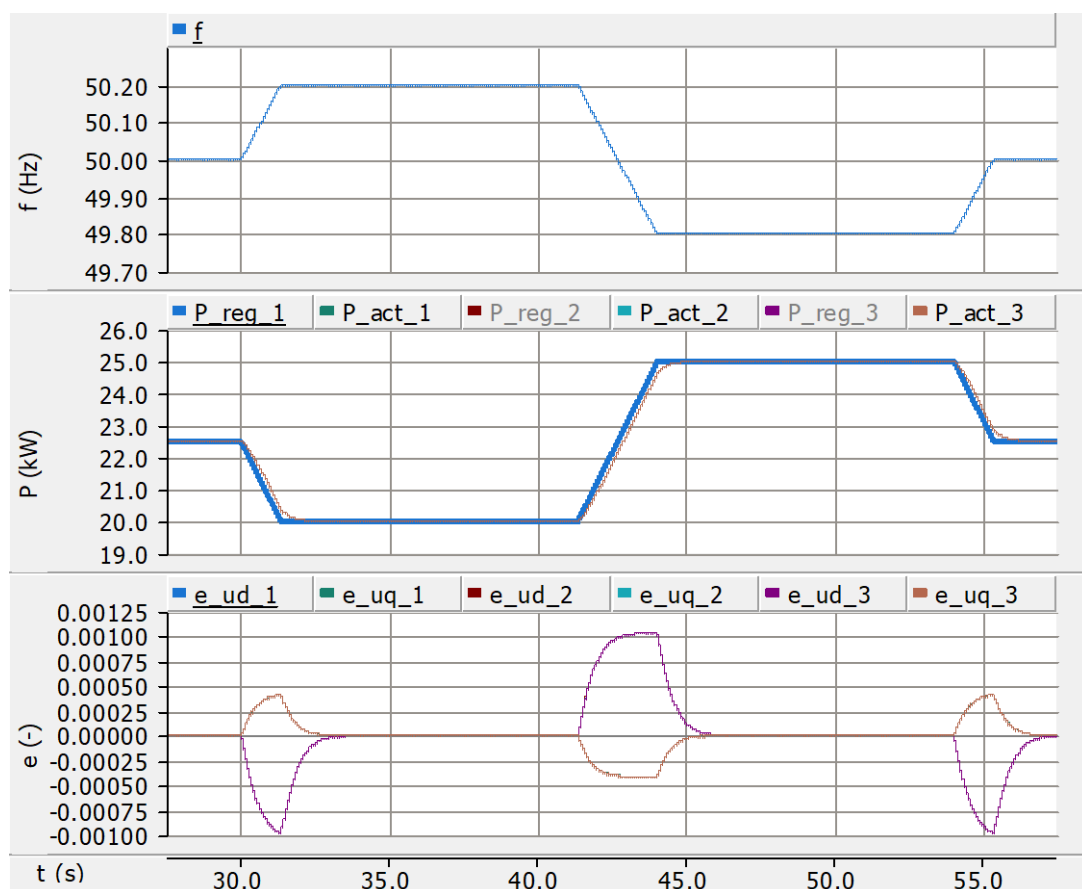
Test 1 je rozdělen do bodů *a* až *h*, dle kombinace výchozí a žádané hodnoty činného ($P_{\max} - \Delta P_i$ a $P_{\min} + \Delta P_i$) a rychlosti změny frekvence (0,15; 0,25 a 0,50 Hz/s). Kombinace testu 1 uvádí tab. 11-7. V případech testů 1a, a 1d by nemělo dojít k překročení meze rychlosti změny frekvence pro iniciaci funkce umělé setrvačnosti – $\beta = 0,2$ Hz/s. Počáteční prodleva testu je 30 s a časová prodleva při dosažení maximální (+200 mHz), resp. minimální (– 200 mHz) odchylky frekvence byla zkrácena na 10 s.

tab. 11-6: Kombinace výchozích a žádaných hodnot činného a jalového výkonu pro simulace schopnosti dodávky rychlého poruchového proudu

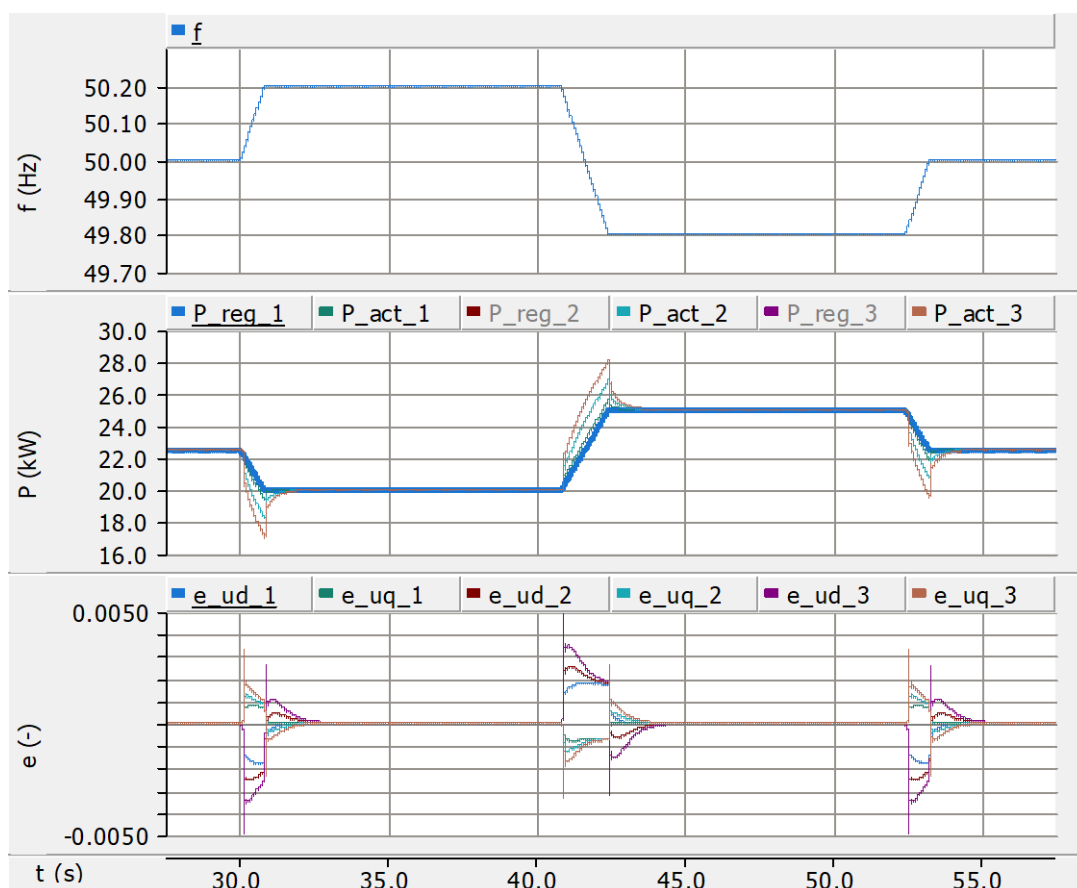
test 1	P (kW)	df/dt (Hz/s)
a	22,5	0,15
b	22,5	0,25
c	22,5	0,50
d	7,5	0,15
e	7,5	0,25
f	7,5	0,50

Provedení simulací

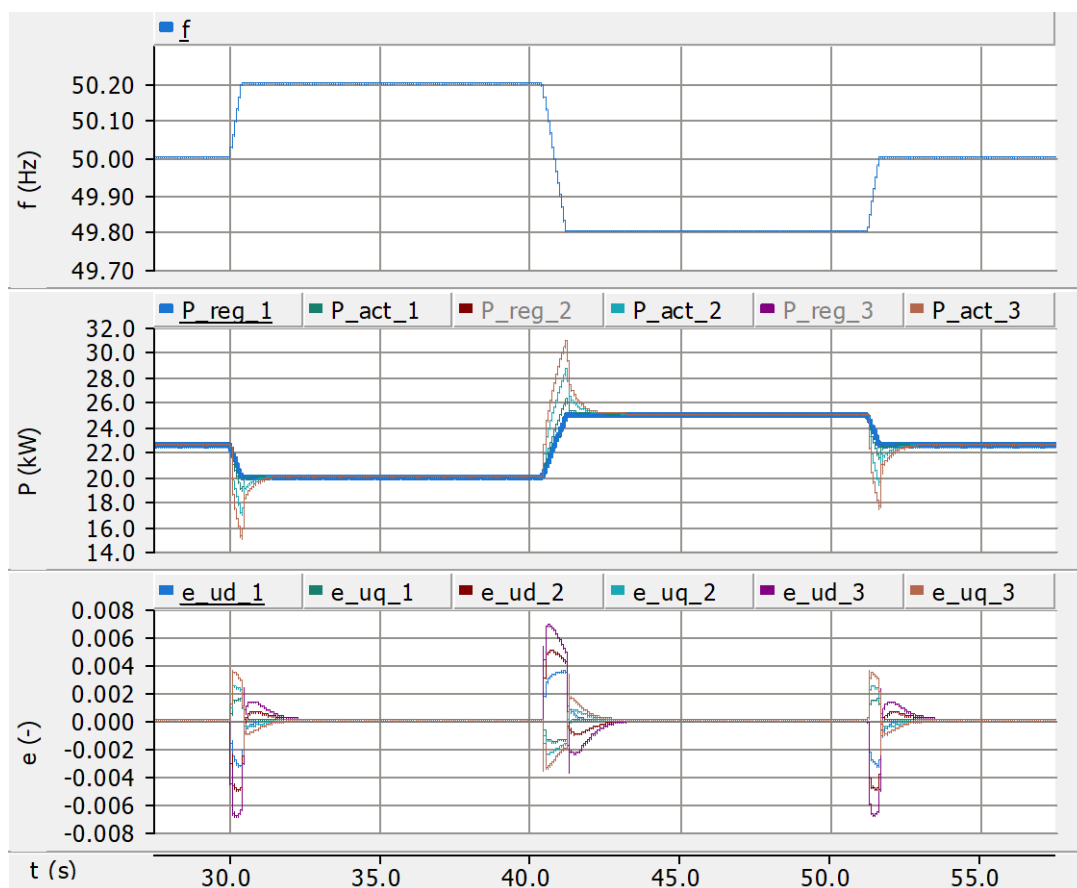
Simulace byly provedeny pro tři různá nastavení setrvačnosti zdroje (H) – 2, 4 a 6. Parametry regulačních obvodů jsou pro všechny VM stejné. Konkrétní nastavení lze dohledat přímo v nastavení modelů VM v souboru SMe09U.pscx a konkrétní simulace lze revidovat změnou přepínačů vztahující se ke konkrétnímu testu. Grafy na obr. 11-48 až obr. 11-53 znázorňují průběhy sledovaných veličin pro testy 1a až 1h. Průběh P_{req_1} v následujících grafech je požadavkem FSM, skutečné měřené průběhy výkonů P_{act_1} , P_{act_2} a P_{act_3} jsou výsledkem součtu požadavků FSM a funkce umělé setrvačnosti.



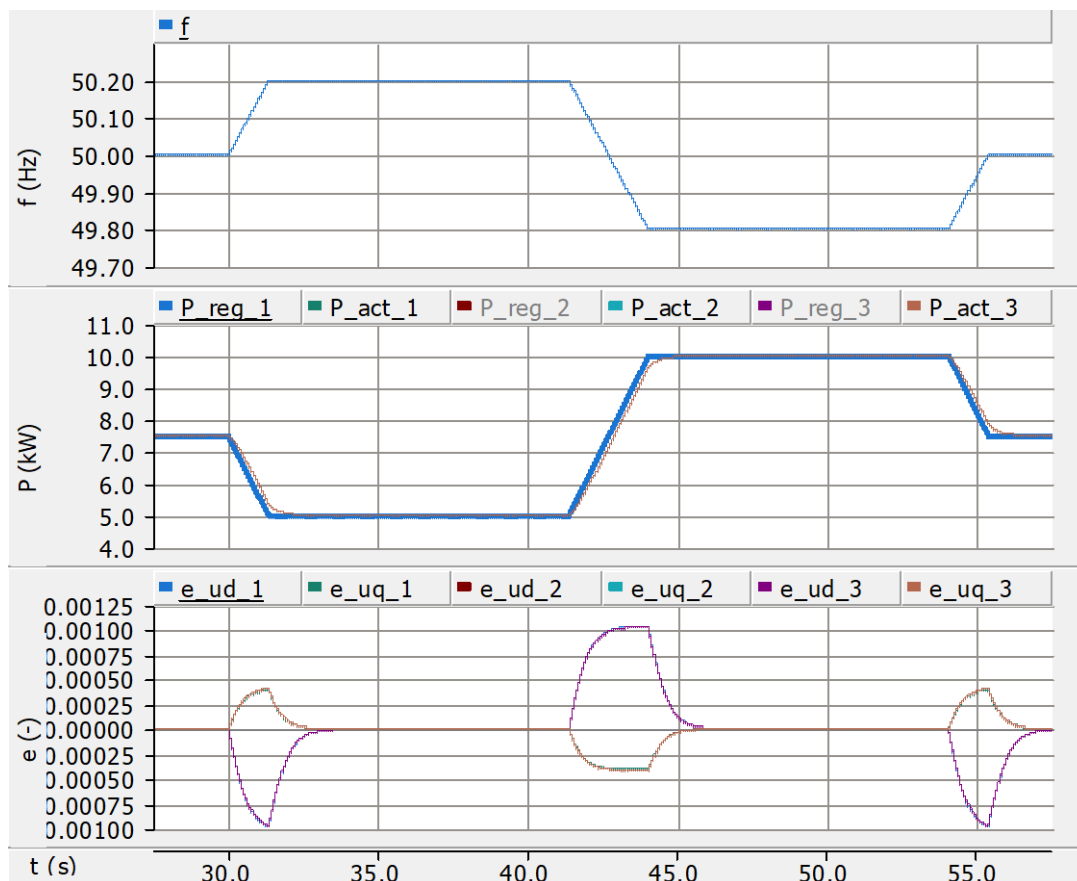
obr. 11-48: SMe09U – test 1a



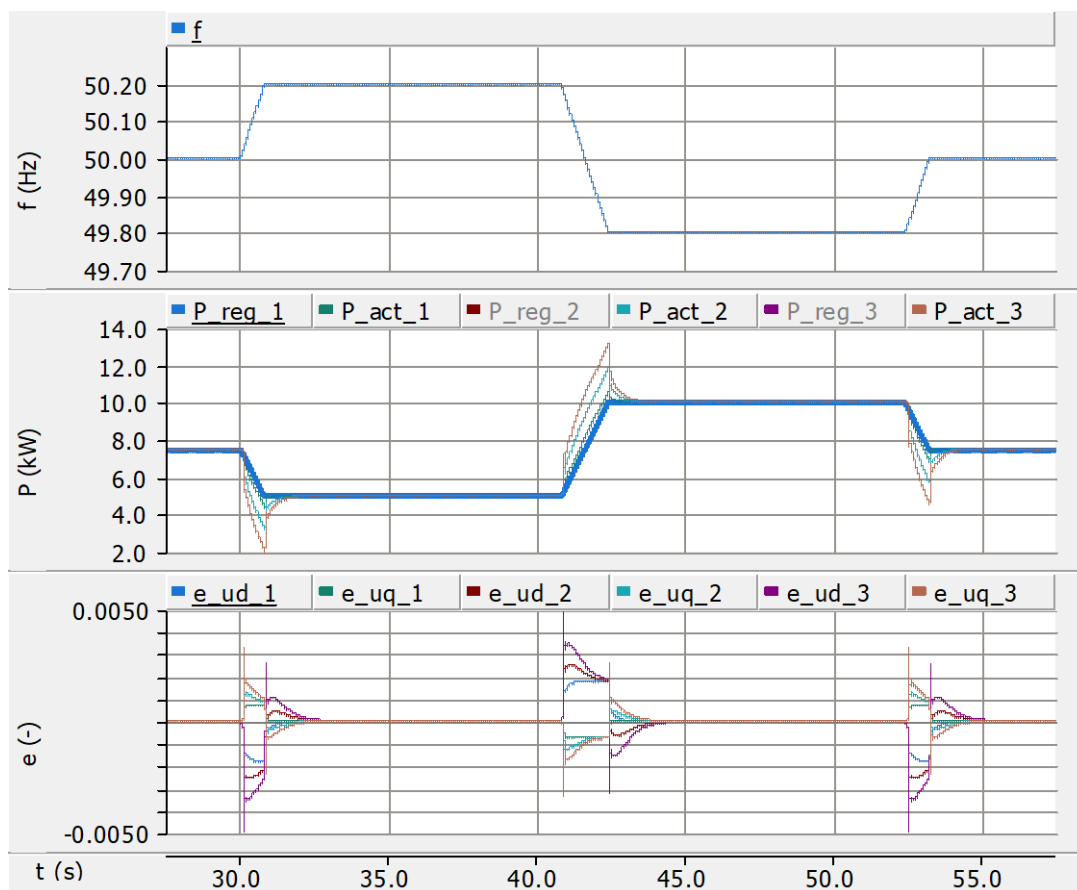
obr. 11-49: SMe09U – test 1b



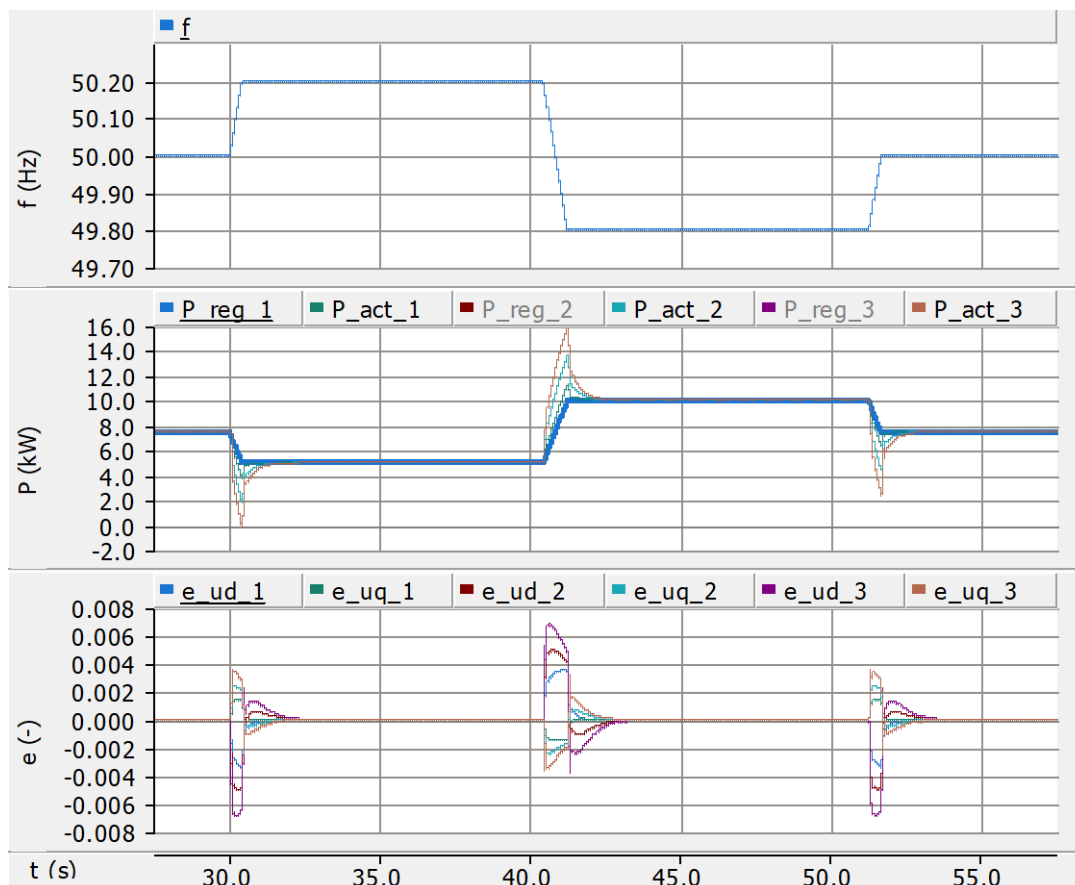
obr. 11-50: SMe09U – test 1c



obr. 11-51: SMe09U – test 1d



obr. 11-52: SMe09U – test 1e



obr. 11-53: SMe09U – test 1f

11.1.10 Simulace regulace tlumení výkonových oscilací (PSS)

Požadavky na rozsah a provedení simulací a měření vlastností PSS jsou popsány v příloze 1 a 2 části I Kodexu PS [2]. Cíle simulace jsou uvedeny v kapitole Simulace regulace tlumení výkonových oscilací (PSS), která je součástí kapitoly 3.1.5.

Popis simulací regulace tlumení výkonových oscilací je vesměs vztažen k problematice vlastností SG. V programu PSCAD existuje možnost přiřadit k modelu SG prvek PSS, který je sestaven podle definic IEEE pro systémové stabilizátory. V hlavní knihovně programu PSCAD je tak k dispozici několik předdefinovaných stabilizátorů – PSS1A, PSS2B, PSS3B a PSS4B. Jejich obecný popis lze nalézt v nápovědě programu PSCAD pod heslem *Power System Stabilizer Models* a popis jejich přenosových funkcí pod heslem *Stabilizer Transfer Functions*. Pokud žádný z těchto stabilizátorů nevyhovuje požadavkům testovaného systému, lze ekvivalentní přenosové funkce stabilizačních systémů zkonstruovat pomocí prvků základní knihovny.

Z pohledu simulací souladu pro postulované modely je studium schopnosti VM tlumit výkonové oscilace okrajovým tématem. Pro SVM je problematika vázána na konkrétní popis simulované soustavy a nastavení komponent buzení a systémového stabilizátoru spolu s parametry modelu SG. Navíc konkrétní metodika pro NVM není uspokojivě řešena právě pro rámec simulování, a hlavně vyhodnocení schopnosti tlumit výkonové oscilace. Z těchto důvodů bylo rozhodnuto, že řešení problematiky regulace výkonových oscilací je nad rámec této práce a konkrétní simulace nebyly sestaveny.

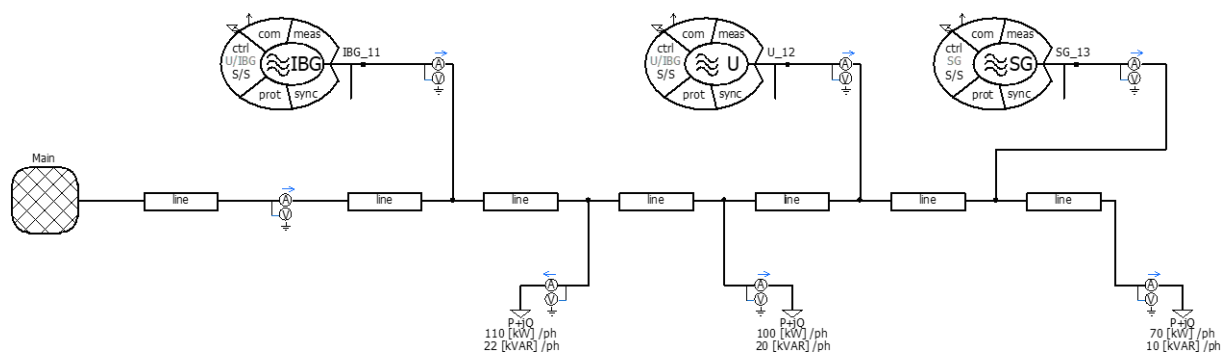
11.2 Funkce modelů

Mimo vlastnosti a funkce VM, které byly ověřeny simulacemi souladu, disponují modely celou řadou dalších vlastností a funkcí, které je možno ilustrovat simulacemi provedenými v rámci této podkapitoly.

11.2.1 PQU charakteristiky

Do simulace vytvořené pro ověření funkcí PQU regulačních charakteristik bylo zahrnuto i ověření a ilustrace dalších funkcí a vlastností modelů VM. Byla sestavena jednoduchá ilustrační síť, jejíž topologie a parametry byly nastaveny tak, aby se daly snadno a správně simulovat požadované situace a stavy. V rámci projektu *SPQU.pscx*, jež je přílohou této práce, a jejíž výstupy jsou uvedeny v této kapitole, jsou ověřovány funkce a vlastnosti VM popsané v následujících odstavcích.

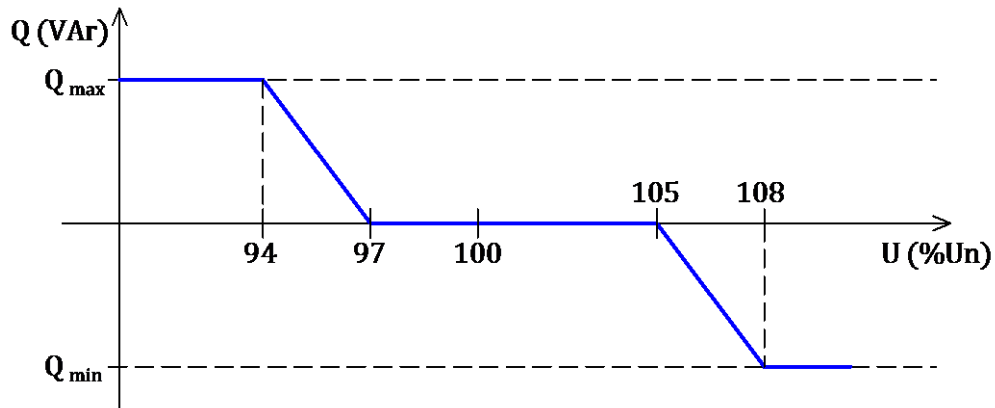
Obecně, funkce frekvenčních závislostí – FSM, LFSM-O a LFSM, jsou neuplatněny a všechny VM pracují v režimu slave – v regulačním módu závislém na synchronním provozu sítě. Dále je každý VM nastaven na určitý druh PQU regulace. Schéma na obr. 11-54 zobrazuje topologii testovací sítě projektu *SPQU.pscx*. Konkrétní, kompletní nastavení všech parametrů všech prvků je uvedeno v příloze této práce – projektu *SPQU.pscx*.



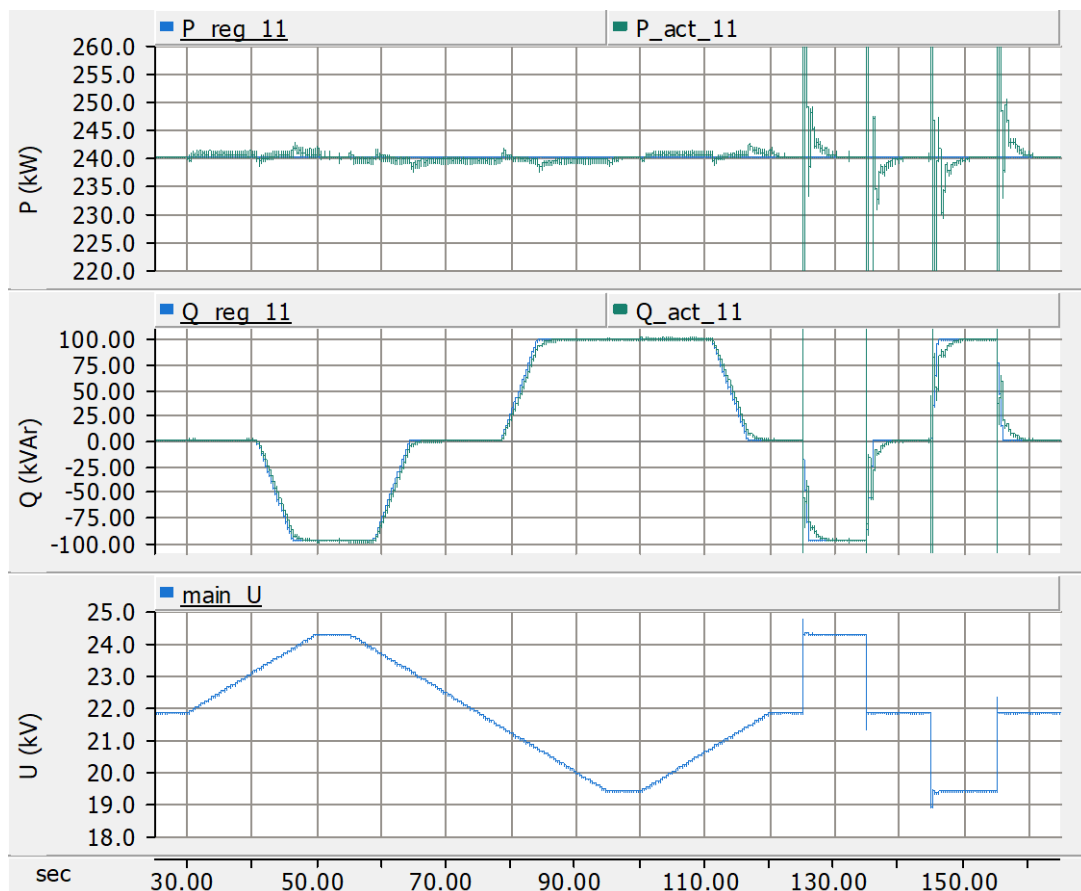
obr. 11-54: Schéma testovací sítě funkcí PQU charakteristik

Ve výstupních grafech průběhů jsou s indexem *req* znázorněny průběhy požadovaných hodnot a s indexem *act* průběhy skutečných hodnot.

Zdroj s označením *IBG_11* je měničový zdroj s nastaveným jmenovitým výkonem 300 kW, požadovaným výkonem odpovídající 80 % nominální hodnoty činného výkonu, nominálním účinníkem 0,95 a s nastavenou závislostí $Q(U)$ dle obr. 11-55. Aby byla tato charakteristika ověřena, je nastavena proměnlivá hodnota napětí sítě, která je reprezentována *modelem sítě*. Průběh napětí je patrný z průběhu napětí *main_U* na obr. 11-56, který zobrazuje právě požadované a skutečné výstupní výkony zdroje *IBG_11* a napětí sítě v místě napojení na vnější síť.



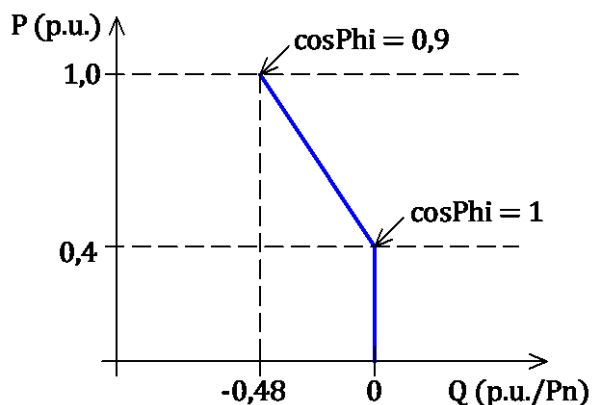
obr. 11-55: Grafické znázornění nastavení $Q(U)$ regulace měničového zdroje



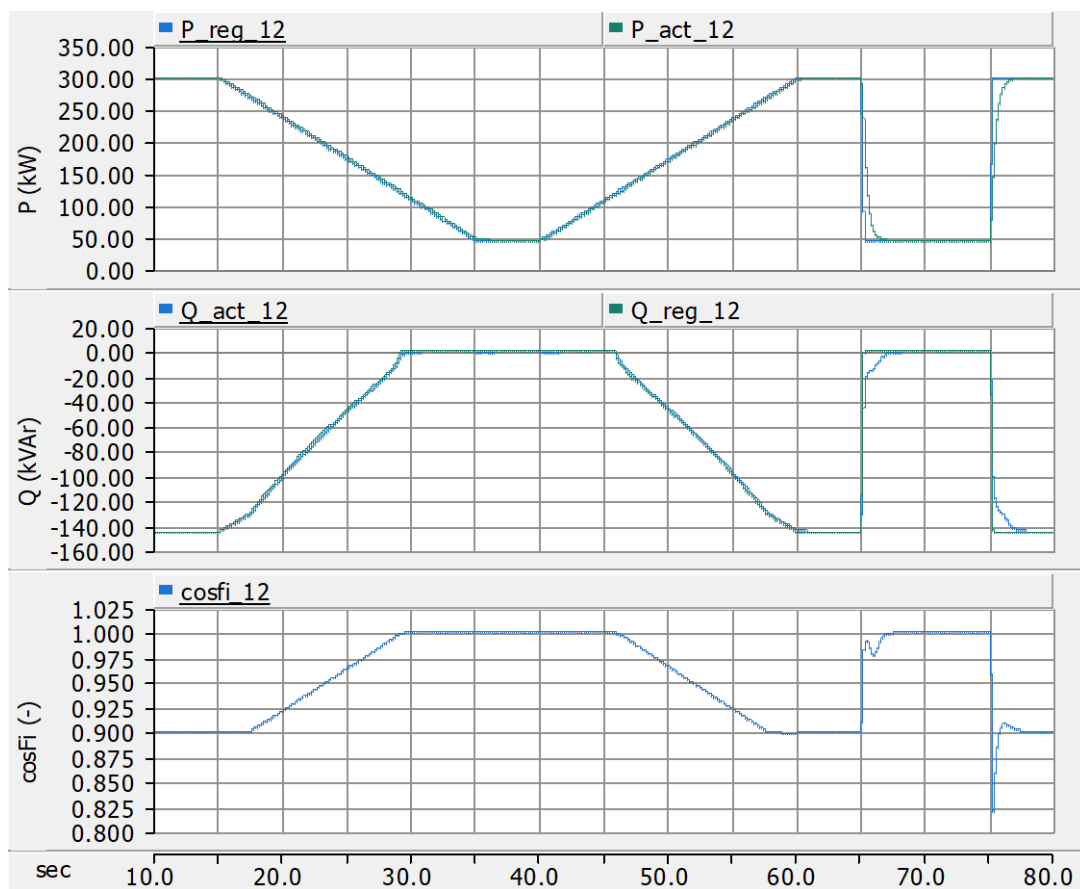
obr. 11-56: Výstupy měničového zdroje s $Q(U)$ regulací

Odezva na skokové změny napětí je dána nejen nastavením funkce regulátoru, ale i nastavenou rampou maximální změny požadovaného jalového výkonu, která byla zvolena 100 kVAr/s.

Zdroj s označením U_{12} je napěťový zdroj s nastaveným jmenovitým výkonem 300 kW, požadovaným výkonem odpovídající 100 % nominální hodnoty činného výkonu, minimální provozní úrovni regulačního pásma 45 kW a s nastavenou závislostí $Q(P)$ dle grafu na obr. 11-57. Aby byla tato charakteristika ověřena, je nastavena proměnlivá hodnota požadovaného činného výkonu zdroje, která je patrná z průběhu požadovaného výkonu $P_{\text{reg_12}}$ na obr. 11-58, který zobrazuje právě výstupní výkony zdroje U_{12} .



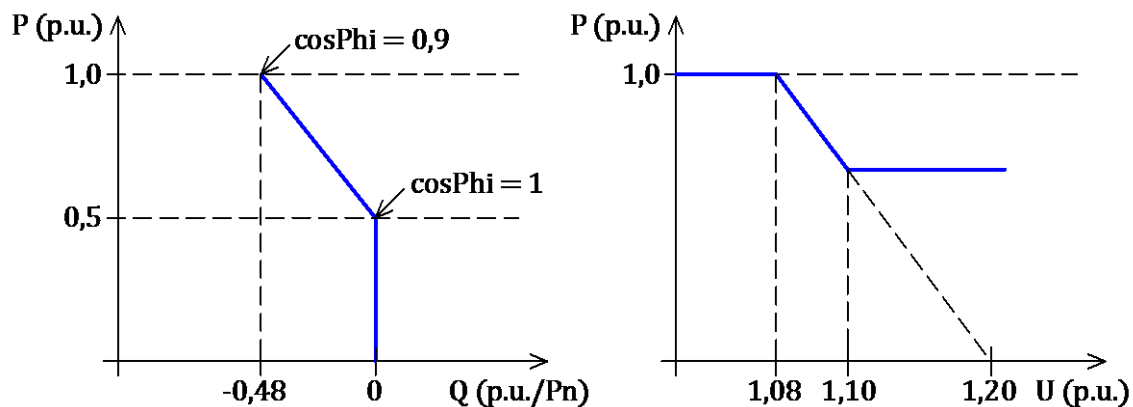
obr. 11-57: Grafické znázornění nastavení $Q(P)$ regulace napěťového zdroje



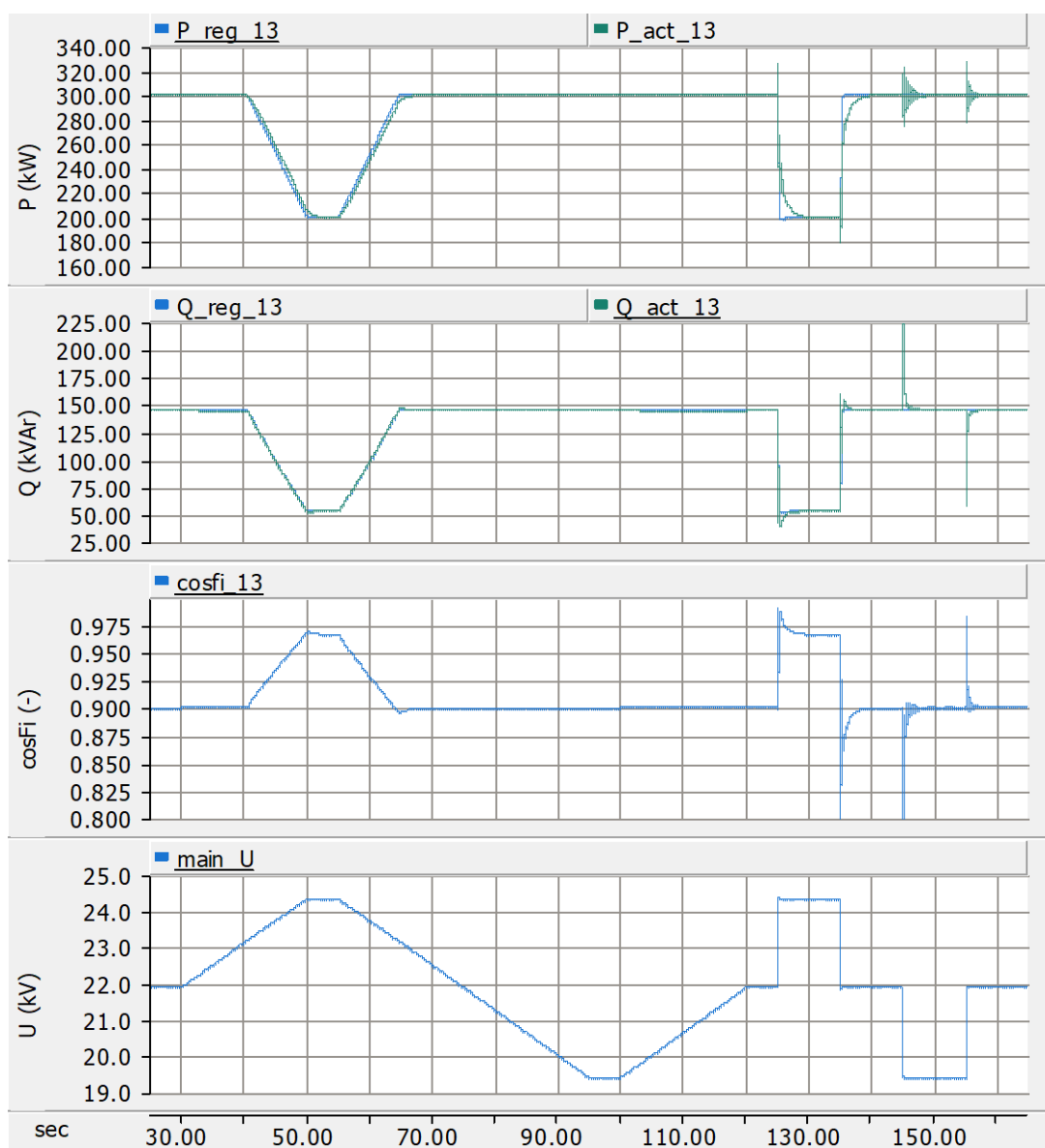
obr. 11-58: Výstupy napěťového zdroje s $Q(P)$ regulací

Odezva na skokové změny činného výkonu je dána nejen nastavením funkce regulátoru, ale i nastavenou rampou maximální změny požadovaného činného a jalového výkonu, které byly zvoleny 1000 kW/s, resp. kVar/s.

Zdroj s označením *SG_13* je synchronní generátor s nastaveným jmenovitým výkonem 300 kW, požadovaným výkonem odpovídající 100 % nominální hodnoty činného výkonu a s nastavenou závislostí $Q(P)$ a $P(U)$ dle grafů na obr. 11-59. Aby byly tyto charakteristiky ověřeny, je nastavena proměnlivá hodnota napětí sítě, která je reprezentována *modelem sítě*. Průběh napětí je patrný z průběhu napětí *main_U* na obr. 11-60, který zobrazuje právě požadované a skutečné výstupní výkony a účinník zdroje *SG_13* a napětí sítě v místě napojení na vnější síť.



obr. 11-59: Grafické znázornění nastavení $Q(P)$ (vlevo) a $P(U)$ (vpravo) regulace synchronního generátoru

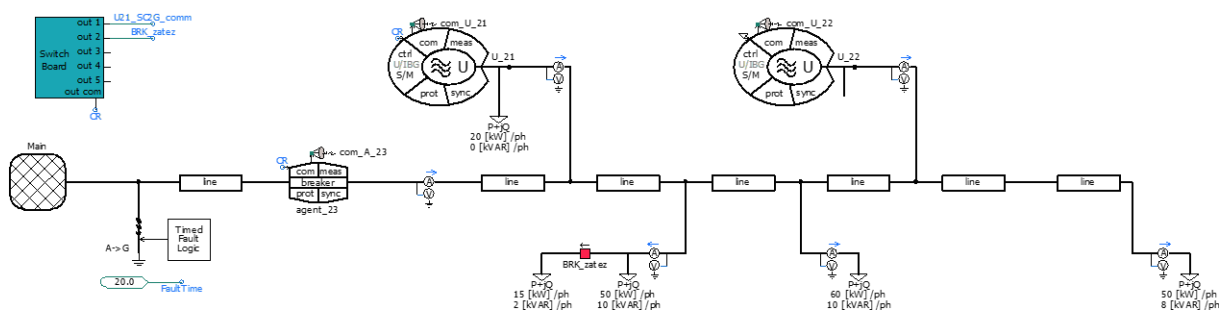


obr. 11-60: Výstupy synchronního generátoru s $P(U)$ a $Q(P)$ regulací

11.2.2 MAS + OP + ochrany

V rámci této kapitoly vznikl projekt *SMAS.pscx*, který má validovat a zároveň ukázat možnosti využití modelů pro řešení MAS v rámci provozu ES. Simulace svým nastavením nabízí možnost ověření funkcí modelu agenta, modelu zdroje a režimu master modelů VM. Dále jsou zde využity funkce modulů ochrany jak VM, tak agenta. Byla sestavena jednoduchá ilustrační síť, jejíž topologie a parametry byly nastaveny tak, aby se daly snadno a správně simulovat požadované situace a stavy.

Obecně, funkce frekvenčních závislostí a PUQ charakteristik nejsou v režimu synchronního provozu (– slave módu) v nastavení VM uplatněny. Jeden z VM je provozován v režimu, kdy v případě vzniku OP zaujímá roli pilotního uzlu – mód master. Schéma na obr. 11-61 zobrazuje topologii testovací sítě projektu *SMAS.pscx*. Konkrétní, kompletní nastavení všech parametrů všech prvků je uvedeno v příloze této práce – projektu *SMAS.pscx*.



obr. 11-61: Schéma testovací sítě funkcí PQU charakteristik

Nominální napětí sítě je zadáno na hodnotu 22 kV. Prvek ústředny (*SwitchBoard*) plní roli zprostředkování komunikace mezi modely VM a agentem a realizuje algoritmus, který se uplatní v rámci povelů realizující scénář ověřovací simulace. Prvek simulace zkratu (*Three Phase Fault*) je nastaven na provedení 1 fázového kovového zkratu v čase 20 s (za pomoci prvku *Timed Fault Logic*). Vypínač (*Breaker*, ovládaný signálem *BRK_zatez*) odpojuje, resp. připojuje danou zátěž dle scénáře v čase 25 s, resp. 30 s.

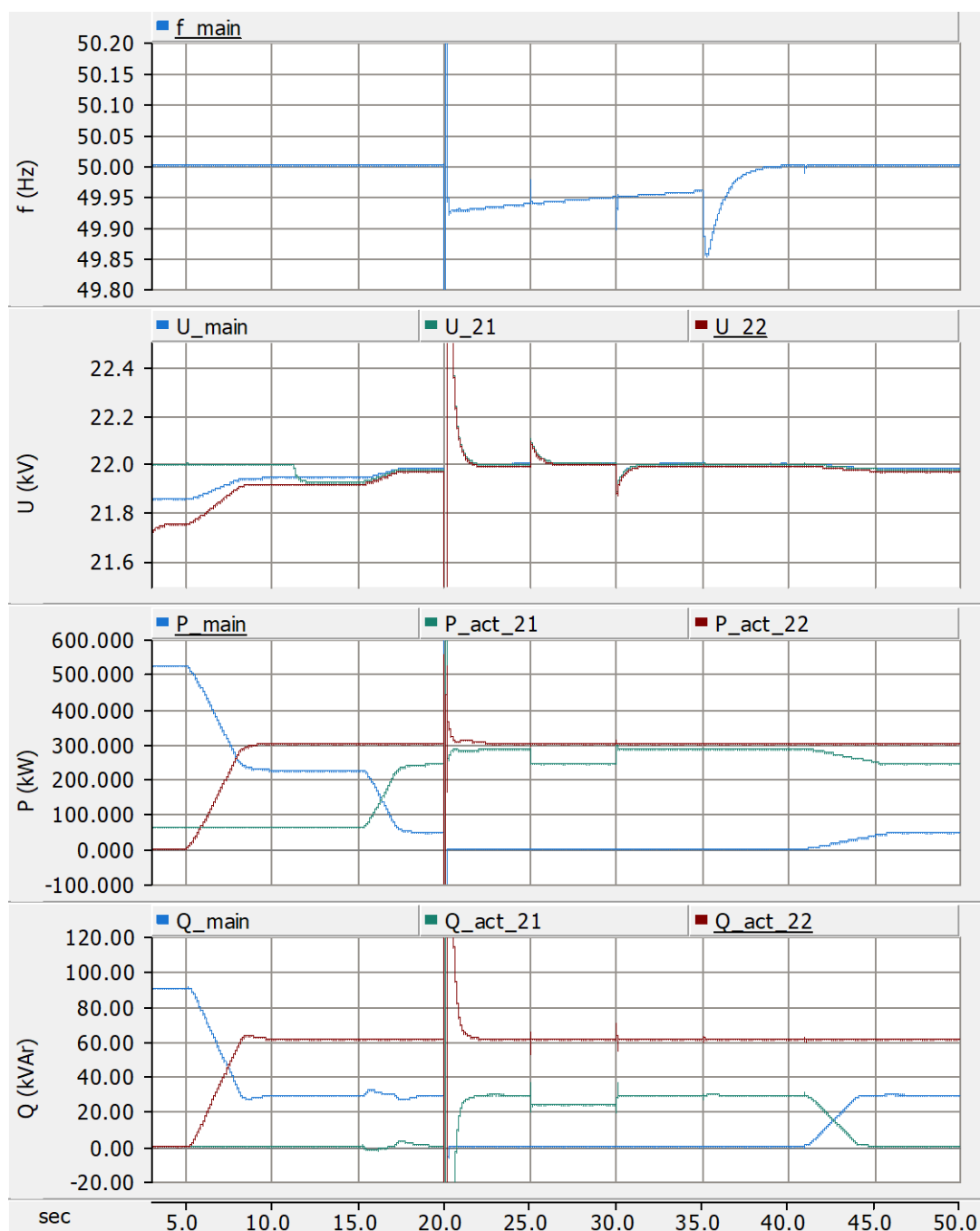
Zdroj s označením *U_21* je nastaven do řídicího módu slave/master (tzn., že v synchronním provozu je VM provozován jako slave (P-Q regulace) a v provozu ostrovním jako master (U/f regulace)). Jedná se o napěťový zdroj s nastaveným jmenovitým výkonem 300 kW, požadovaným výkonem odpovídající 80 % nominální hodnoty činného výkonu (který se uplatní v režimu slave), minimální provozní úrovní regulačního pásma 45 kW, jmenovitým účinníkem 0,95 kap./ind., rampami maximálních rychlostí změn činného a jalového výkonu v synchronním režimu (po prvním přifázování) 10 kW, resp. kVAR a žádanou hodnotou napětí v ostrovním režimu 22 kV, která je držena v místě připojení zdroje na síť. VM spuštěn do režimu vlastní spotřeby. Povel pro připojení tohoto provozu na síť je iniciován najetím zdroje *U_22* po přifázování na nominální výkon. Pro detekci OP je modulu ochrany povolena a nastavena funkce RoCoF, která při překročení nastavených limitů dává povel k iniciaci nesynchronního provozu. VM *U_21* vytváří komunikační kanál s agentem (skrze prvek ústředny), pomocí kterého v rámci této simulace podává informaci o požadavku znovupřipojení ostrova k síti, čímž poveluje agenta k tomu, aby v případě splnění fázovacích podmínek provedl sepnutí svého vypínače. Zároveň je tímto kanálem blokováno nechtěné sepnutí vypínače agenta v případě náhodného splnění fázovacích podmínek synchronního provozu.

Zdroj s označením *U_22* je nastaven do řídicího módu slave/slave. Je to napěťový zdroj s nominální i žádaným výkonem 300 kW, pracující s účinníkem 0,98 kap. Vnější komunikace

tohoto VM dává do prvku ústředny informaci o jmenovitém výkonu, který zde v okamžiku dosažení nominální hodnoty po přiřazování na síť dává povel VM *U_21* k připojení jeho provozu ve vlastní spotřebě na síť. Tento VM má za úkol svým nastavením držet zadané parametry ve všech provozních stavech sítě.

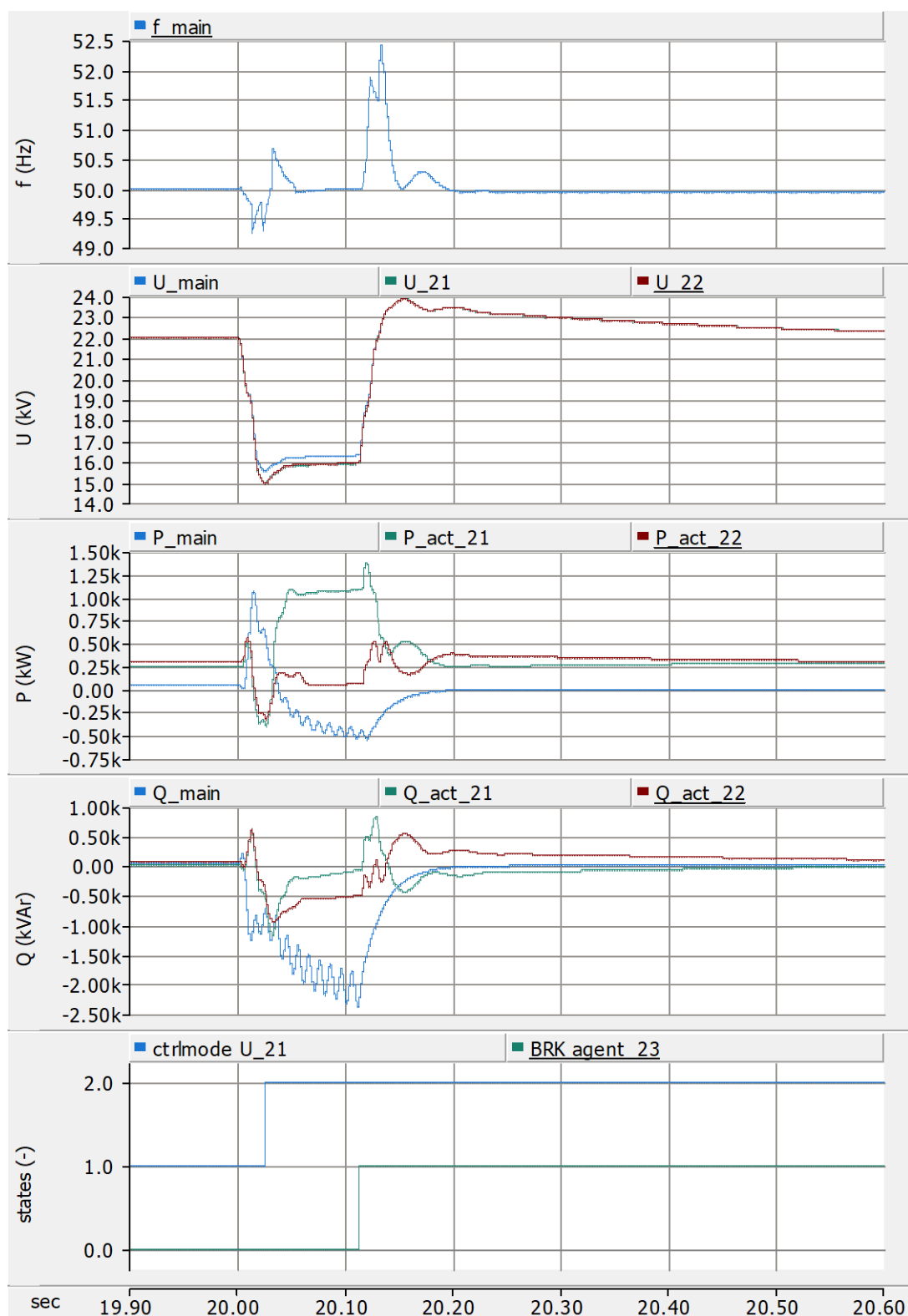
Agent s označením *agent_23* má pro ilustraci funkce odpojení jeho vypínače aktivovanou a nastavenou podpěťovou ochranu, jejíž aktivace vede k rozepnutí jeho vypínače. Dálkovou komunikací zdroji *U_21* podávána informace o odchylce frekvence, fáze a velikosti napětí, která je potřebná při procesu resynchronizace ostrova k síti.

Popis nastavení prvků simulace v předchozích odstavcích nastiňuje scénář ověřovací simulace. Po spuštění simulace je zdroj *U_21* uveden do provozu na vlastní spotřebu a zdroj *U_22* do synchronizačního procesu. Povolení k přiřazování zdroje *U_22* je nastaveno na čas 5 s, kdy jsou již splněny fázovací podmínky a dojde k přiřazování na síť s následným najetím na nominální výkon trendem 100 kW/s. Nominálního výkonu zdroje *U_22* je dosaženo v čase cca 11 s, kdy dojde k povelu pro přiřazování i zdroje *U_21* k síti. To nastane cca v čase 15 s. Následuje najetí zdroje *U_21* na požadovaný výkon 240 kW (80 % z 300 kW) trendem 100 kW/s. Tím je docíleno synchronního provozu obou VM. V čase 20 s nastává zkrat, který má za následek odpojení vypínače agenta *agent_23*, a tím vyčlenění ostrova a zároveň detekci OP zdrojem *U_21*, který přechází do režimu master a odregulovává bilanci výkonů, resp. frekvenci a velikost napětí sítě. V čase 25 s dochází k odpojení části zátěže ostrova a v čase 30 s k jeho opětovnému připojení s cílem ověřit schopnost regulace režimu master zdroje *U_21*. V čase 35 s dochází nastavenou vnitřní proměnnou zdroji *U_21* povel k resynchronizaci ostrova k síti. Zdroj *U_21* tak do svého procesu řízení komponuje i parametry odchylek frekvence, fáze a velikosti napětí z rozpadového místa prostřednictvím dálkové komunikace s agentem *agent_23*. V čase cca 41 s dochází ke splnění fázovacích podmínek, sepnutí vypínače agenta *agent_23* a obnovení synchronního provozu. VM *U_21* sjíždí s výkonem na původní výkon 240 kW s trendem 10 kW/s. Celý tento proces – průběh zobrazují grafy na obr. 11-62.



obr. 11-62: Půběhy simulace SMAS.pscx

Nastavením ochranných funkcí agenta *agent_23* a zdroje *U_21* lze koordinovat přechod do OP a vyhodnocovat odezvu agenta, VM a potažmo systému jako takového. Tento dynamický děj je pro použité nastavení ilustrováno na obr. 11-63, které je přiblížením průběhů výše s doplněnou informací o řídicím módu zdroje *U_21* – průběh *ctrlmode U_21* (*ctrlmode* = 1 je pro režim slave (P-Q regulace), *ctrlmode* = 2 je pro režim master (U/f regulace)) a stavu vypínače agenta *agent_23* – *BRK agent_23* (hodnota 0 pro stav sepnuto, 1 rozepnuto).



obr. 11-63: Půběhy simulace SMAS.pscx – detail

Z průběhu lze vysledovat, že přechod VM U_{21} do OP byl inicializován autonomně (logicky zapůsobením ochrany RoCoF, který byla jako jediná aktivní a jejíž popud byl nastaven pro inicializaci přechodu do OP) a ne od komunikace agenta, který poruchu a tím i popud k rozepnutí svého vypínače vydal později. Právě na podobných simulacích lze sledovat, jaké důsledky má různé nastavení a koordinace ochran, jaké důsledky by mělo nesprávné vyhodnocení OP atp.

11.3 Benchmarky

V rámci této práce vznikly 2 pracovních projekty, které měly za úkol ověřit, potvrdit nebo vyvrátit určité hypotézy či ukázat srovnání použitých metod či nastavení. Benchmarky jsou obecně nástrojem, který pomáhá objasnit určité procesy v rámci například výpočetního algoritmu programu cestou zkoušky/pokusu přímo, ne za pomoci složitého rozboru, který by nebyl relevantní vzhledem k rozsahu a zaměření této práce.

Každý benchmark je uveden popisem účelu samotného test. Následný popis zjednodušeně popisuje strukturu a průběh prováděné simulace. Výstupem jsou závěr shrnující popis výsledků a zhodnocení návazností či voleb použitých v praktické části této práce.

11.3.1 Benchmark 01 – Harmonické vs. krok výpočtu

Tento benchmark vznikl za účelem ověření závislosti přesnosti určování harmonických složek na kroku výpočtu (*Solution time step*). Použitý časový krok simulace rozděluje analyzovaný signál do souboru po sobě následujících hodnot, čímž dochází ke zkreslení oproti analogovému signálu. Pokud je takovýto digitalizovaný signál naveden do výpočetního algoritmu rychlé Fourierovy transformace (FFT - Fast Fourier Transform), dochází k nepřesnosti výpočtu.

Do simulací byly použity mimo základní harmonické signálu (50 Hz) signály 11. (550 Hz), 23. (1150 Hz) a 40. (2000 Hz) harmonické. Velikost amplitud 11., 23. a 40. harmonické byla 0,1 (10 % velikosti základní harmonické), velikost 1. harmonické byla 1. V tab. 11-7 jsou shrnuty výsledky simulací stejného pracovního projektu – *B01.pscx* (který je přílohou této práce), provedených s různými časovými kroky výpočtu.

tab. 11-7: Relativní chyba určení THD při různém výpočtovém kroku simulace

Harmonická	f (Hz)	Kroku výpočtu					
		5 μs		10 μs		33,3333 μs	
		S/T (-) ²⁵	δ (%) ²⁶	S/T (-)	δ (%)	S/T (-)	δ (%)
základní	50	4000,00	-0,00753	2000,00	-0,00757	600	-0,00879
11.	550	363,64	-0,00987	181,82	-0,01734	54,55	-0,11865
23.	1150	173,91	-0,01782	86,96	-0,05057	26,09	-0,49129
40.	2000	100,00	-0,04276	50,00	-0,12399	15,00	-1,68887
	THD vypočtené	THD simulace		THD simulace		THD simulace	
	17,3205	17,3177	-0,01596	17,3107	-0,05639	17,1898	-0,754372
		50 μs		100 μs			
		S/T (-)	δ (%)	S/T (-)	δ (%)		
základní	50	400,00	-0,01009	200,00	-0,02186		
11.	550	36,36	-0,25489	18,18	-0,99987		
23.	1150	17,39	-1,08386	8,70	-4,28233		
45.	2000	10,00	-3,76825	5,00	-17,51470		
		THD simulace		THD simulace			
		17,0307	-1,67318	16,0676	-7,23348		

Z tab. 11-7 lze vyčíst relativní chybu určení konkrétní harmonické, která roste se zvyšujícím se výpočetním krokem a snižujícím se počtem vzorků během jedné periody dané frekvence. Zejména chyba určení základní harmonické při nejpoužívanějším výpočetním kroku 50 μs (-0,01009 %) by měla být brána do úvahy například při řešení algoritmu numerického určení frekvence. Chyba se samozřejmě odvíjí od míry podílu vyšších harmonických složek.

Výstupem tohoto benchmarku je informace o nutnosti zvážení volby konkrétního výpočetního kroku simulace. Větší časové kroky mohou vést ke skreslení interpretované informace. Obecně je pro většinu simulací vhodný výpočetní krok 50 μs, který je dostatečný i pro studie přechodných dějů. V praxi dochází také ke skreslení měřeného signálu – v závislosti na kvalitě měřicího kanálu, zejména vzorkovací frekvenci a počtu bitů úrovní, což vede k úvaze o tom, do jaké míry je nutné řešit optimální časový krok simulace.

V programu PSCAD lze tuto nepřesnost ošetřit použitím interpolační kompatibility (viz. stranu 115), za cenu zvětšení výpočetního času.

11.3.2 Benchmark 02 – Určení frekvence v simulačním prostředí

Účelem tohoto benchmarku bylo určit vhodnou metodu a nastavení procesu určování frekvence v rámci simulací v prostředí programu PSCAD. Problematika měření frekvence je diskutována v kapitole 10.1.4 jako součást popisu *modulu měření* a dále popsána v rámci kapitoly 6.6.2 zabývající se popisem problematiky měření frekvence v rámci simulačního prostředí

²⁵ vzorek/perioda (Sample/T): $S/T = \frac{1}{\text{frekvence}} / \text{časový_krok_simulace}$

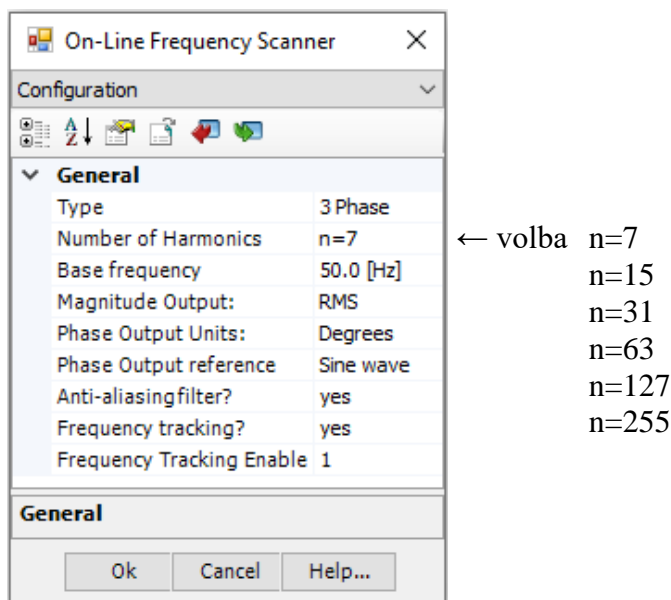
²⁶ relativní chyba: $\delta = \frac{(\text{měřená_hod.} - \text{skutečná_hod.})}{\text{skutečná_hodnota}} \cdot 100$

programu PSCAD, a s odkazem na kapitolu On-Line Frequency Scanner, které jsou součástí kapitoly 6.6, popisující samotné prvky pro měření frekvence.

Benchmark, jehož pracovní projekt *B02.pscx* je přílohou této práce, má za cíl porovnat různé přístupy k určování frekvence v rámci simulačního prostředí programu PSCAD. Celá úloha je dosti zjednodušená a neobsahuje studium kompletní škály vlivů, které mají vliv na určování frekvence signálu. Projekt simulace je nastaven s časovým krokem simulace $t_{\text{step}} = 30 \mu\text{s}$, což dává možnost využít maximální nastavitelný počet harmonických pro výpočet frekvence u prvku On-Line Frequency Scanner (255 harmonických). S úvahou, že nejpoužívanější simulační krok je $50 \mu\text{s}$, nebylo do benchmarku zahrnuto studium vlivu výpočetního kroku na přesnost určení frekvence. Vliv změny takto malého výpočetního kroku má marginální vliv oproti právě řešeným harmonickým složkám vyskytujících se ve vyhodnocovaném signálu. Signál, který je analyzován prvky pro výpočet frekvence má pouze ilustrovat harmonický nebo zkreslený průběh a je tvořen čistě prvky pro generování signálů konkrétních harmonických. Užití jakéhokoli stochastického prvku pro generování vyhodnocovaného signálu by vedlo k nemožnosti určení skutečné frekvence nosné harmonické složky a tím i irelevantnosti výsledků simulací.

Pro vyhodnocení frekvence generovaného signálu bylo použito dvou prvků ze základní knihovny programu PSCAD – *On-Line Frequency Scanner* a *Frequency/Phase/RMS meter*. Jedním z cílů tohoto benchmarku je poukázat na nepoužitelnost druhého jmenovaného prvku bez ošetření vstupního signálu i přes jeho níže jasně patrné přednosti v některých situacích. Tvorba vlastního algoritmu výpočtu frekvence by jednak mělo za důsledek zvýšení výpočetního času při použití vytvořeného prvku a jednak by bylo nad rámec této práce. Obecně, problematika správného určení základní frekvence signálu není jednoduchá.

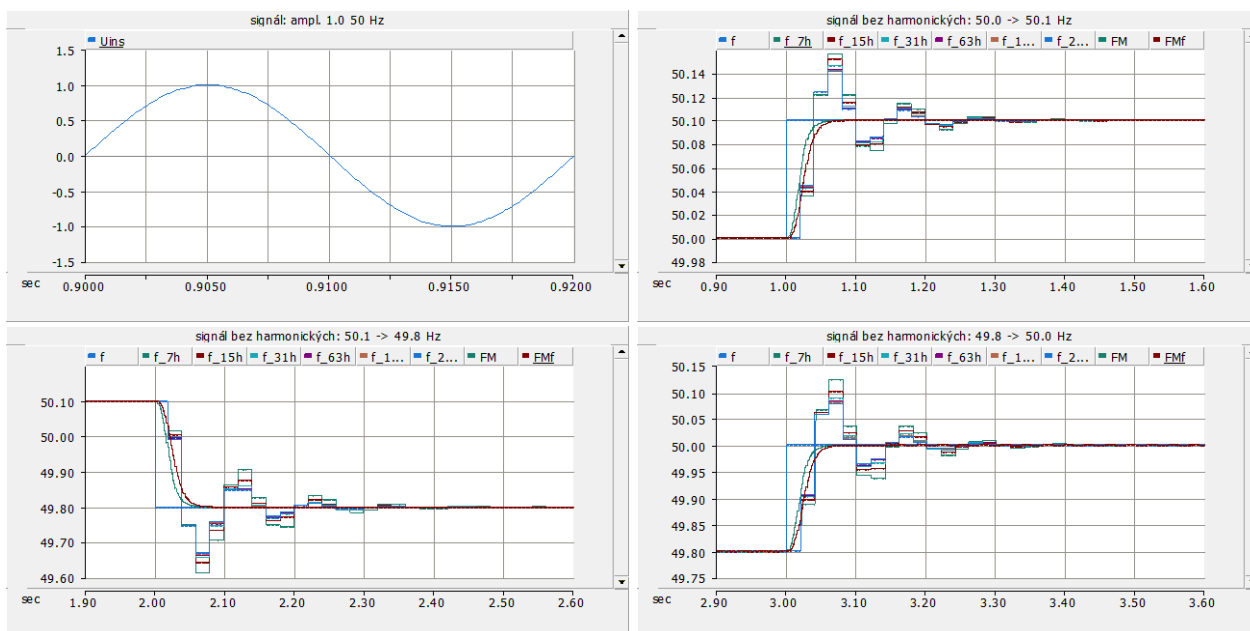
Při všech simulacích bylo nastavení prvku *On-Line Frequency Scanner* následující:



Druhý sledovaný prvek byl použit ve dvou zapojeních. První zapojení reprezentuje stav klasického přístupu při použití tohoto prvku – prvek *Frequency/Phase/RMS meter* byl připojený přímo k „silovému“ signálu. Druhé zapojení se snaží obejít zjevnou nevýhodu tohoto prvku, a to nesprávné vyhodnocení frekvence při výskytu harmonických složek tím, že výstup měření napětového signálu (toho, u kterého měla být určena frekvence) prochází přes filtr – přenosovou funkci druhého řádu, který je nastaven na propust signálu frekvence 50 Hz, čímž je provedena snaha o odstranění vlivu jiných harmonických složek. Výstupní signál filtru je pak veden na prvek

napětového zdroje, kde je generován „silový“ signál, se kterým již prvek *Frequency/Phase/RMS meter* již umí pracovat.

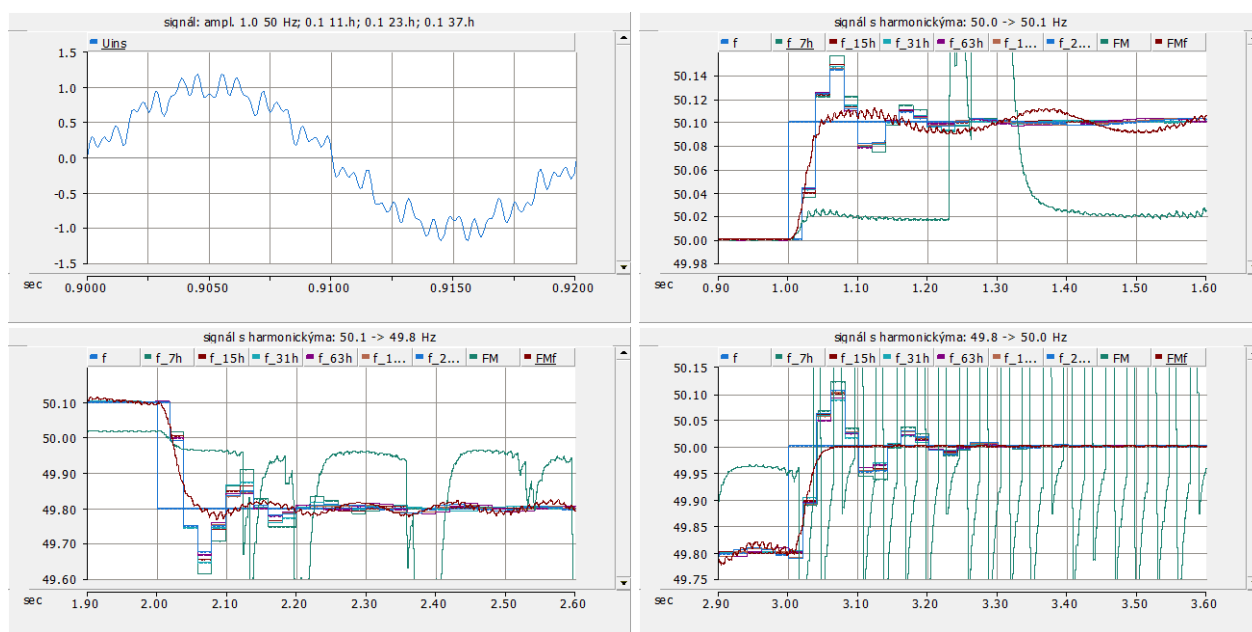
První simulace je zaměřena na reakci vyhodnocovacího algoritmu frekvence při změně základní prevence signálu, bez přítomnosti jiných harmonických složek. Na obr. 11-64 je ilustrován v levé horní části průběh vyhodnocovaného signálu, který je generován jako sinusový průběh s amplitudou rovnou jedné. (Zobrazen je vždy jen průběh jedné vlny jedné fáze. Ostatní 2 fáze generovaného signálu, které jsou nutné pro určení frekvence pomocí zmíněných prvků, jsou logicky posunuty o 120° , resp. -120°). V pravém horním grafu je zobrazena reakce na skok frekvence z 50 Hz na 50,1 Hz. Modrý průběh (f) je signál frekvence, který vstupuje do prvku generujícího signálovou vlnu – sinusový průběh, v tomto případě zobrazen v levém horním grafu. Jedná se tedy o skutečnou frekvenci generovaného/vyhodnocovaného signálu. Další průběhy zobrazené v grafech (f_{7h} , f_{15h} , f_{31h} , f_{63h} , f_{127h} , f_{255h}) jsou výstupy prvků *On-Line Frequency Scanner* s nastaveným počtem harmonických pro vyhodnocení (viz kapitolu *On-Line Frequency Scanner*, strana 123) rovnající se číslu v označení signálu. Počet nastavených harmonických se odráží na přesnosti určení frekvence. Nicméně výhodnost použití vyššího počtu harmonických padá s reálným nárůstem výpočetní náročnosti, který je vždy nutné zvážit s ohledem na požadovanou přesnost určení frekvence. Zmíněný pojem „výpočtová náročnost“ je složité definovat. Částečně a prakticky je tato problematika diskutována na konci této kapitoly. Dalším průběhem zobrazeným v grafech je signál s označením *FM*, který náleží výstupu prvku *Frequency/Phase/RMS meter*. Tento signál má oproti ostatním vypočítávaným „nejpožadovanější“ průběh. To ostatně platí i během změn signálu na dalších grafech – v levém spodním, při změně z 50,1 Hz na 49,8 Hz a v pravém spodním, při změně z 49,8 Hz na 50,0 Hz. Posledním zobrazeným výstupem je signál *FMf* odpovídající výstupu prvku *Frequency/Phase/RMS meter* s použitou filtrací. I zde je přesnost a rychlost určení frekvence na dobré úrovni.



obr. 11-64: Změny frekvence základního signálu, bez harmonických složek

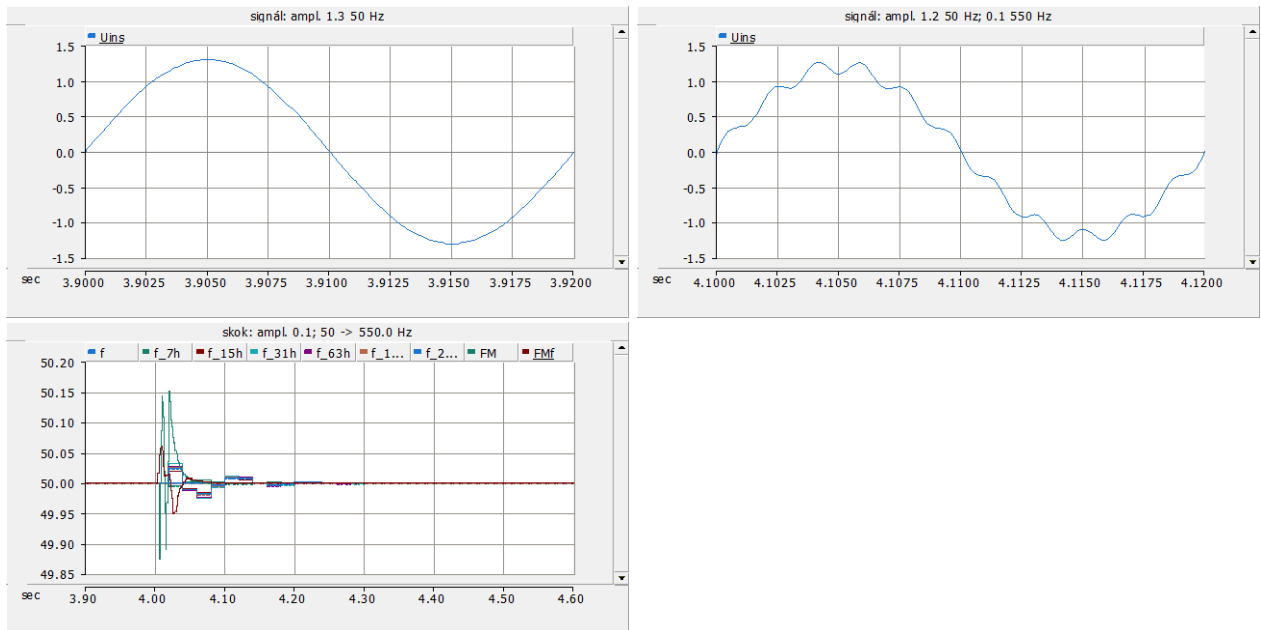
Druhá simulace v rámci tohoto benchmarku je zaměřena na určení frekvence harmonického signálu s obsahem vyšších harmonických složek a reakci při změně frekvence obdobně jako Generovaný signál je součtem signálu základní harmonické 50 Hz s amplitudou 1, signálu 550 Hz (11. harmonické) s amplitudou 0,1, signálu 1150 Hz (23. harmonické) s amplitudou 0,1 a signálu 1850 Hz (37. harmonické) s amplitudou 0,1 a je zobrazen v levém horním grafu na obr. 11-65.

Všechny signály mají totožnou fázi. V konkrétních časech simulace dochází opět ke změnám frekvence základní harmonické signálu, stejně jako u první simulace. Grafy nahoře vpravo a dole na obr. 11-65 zobrazují průběhy výsledků algoritmů výpočtu frekvence, stejně jako v první simulaci. Zde jde vidět zjevná příčina nemožnosti použití prvku *Frequency/Phase/RMS meter* v simulacích, kde se vyskytují vyšší harmonické složky signálu napětí. Problém nenastává v případě, že frekvence základní harmonické zůstává 50 Hz, ale v případě jakékoliv změny změny frekvence základní harmonické. V případě použití filtru (signál *FMf*) je výsledek podstatně lepší, nikoliv však uspokojivý. Existuje možnost efektivněji vyfiltrovat signál základní harmonické, nicméně to by přineslo složitost a nutnost zakomponování dalších možností nastavení v modelech prezentovaných v této práci. A opět, závislost počtu harmonických pro výpočet frekvence v rámci prvku *Line Frequency Scanner* je víceméně marginální oproti potřebné výpočtové náročnosti.



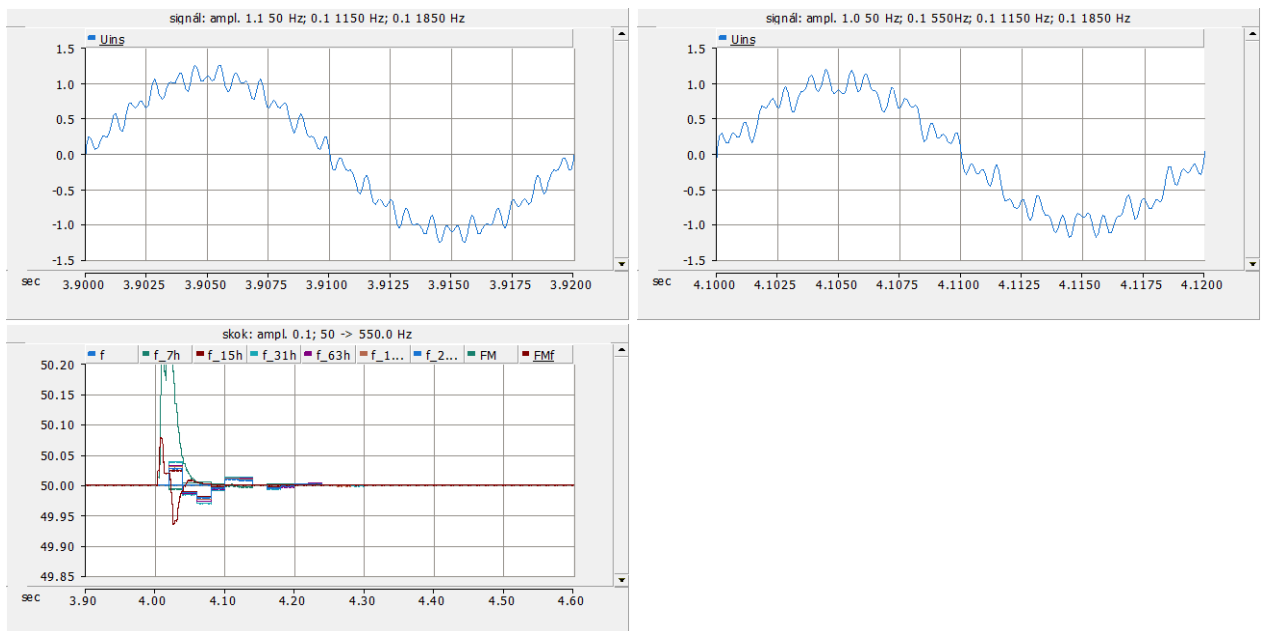
obr. 11-65: Změny frekvence základního signálu, s harmonickými složkami

Třetí simulaci je sledována odezva prostředků měření frekvence na skokovou změnu poměru harmonických složek. Ze signálu základní harmonické s amplitudou velikosti 1,3 byla složce o velikosti 0,1 změněna frekvence na 550 Hz (11. harmonická). Oba signály, před, resp. po změně, jsou zobrazeny na obr. 11-66 nahoře vlevo, resp. vpravo. Výstupní signál prvků měřící frekvenci je na tomtéž obrázku, v grafu vlevo dole.



obr. 11-66: Změna poměru harmonické složky z nezkresleného signálu

Podobně jako třetí simulace byla provedena simulace čtvrtá. Rozdíl byl v signálu, který vstupuje do prvků vyhodnocující frekvenci. V tomto případě šlo o signál obsahující původně složku s frekvencí 50 Hz o velikosti amplitudy 1,1, složku s frekvencí 1150 Hz (23. harmonická) o velikosti amplitudy 0,1 a složku s frekvencí 1850 Hz (37. harmonická) o velikosti amplitudy 0,1. Změna poměru harmonických nastala odebráním složky základní harmonické o velikosti amplitudy 0,1 a nahrazením ji složkou stejné amplitudy o frekvenci 550 Hz (11. harmonická). Oba signály, před, resp. po změně, jsou zobrazeny na obr. 11-67 nahoře vlevo, resp. vpravo. Výstupní signál prvků měřící frekvenci je na tomtéž obrázku, v grafu vlevo dole.



obr. 11-67: Změna poměru harmonické složky ze zkresleného signálu

Třetí a čtvrtá simulace ukazují ne příliš uspokojivé výstupy algoritmů měřící frekvenci. Nicméně s uvažováním toho, že takto výrazná změna poměru harmonických je v praxi málo pravděpodobná, lze schopnost prvků měření frekvence označit za uspokojivé a lze s nimi v dalších simulacích pracovat. Vždy je však nutné mít na paměti, že právě chyba určení správné frekvence

může v dalších návaznostech systému (řídící obvody, bezpečnostní systémy) způsobovat nesprávnou funkci celku.

Pro měření frekvence se zdá být celkově nejvhodnější použít prvek *Frequency/Phase/RMS meter* s filtrem tak, jak bylo prezentováno v tomto benchmarku. Nicméně jeden z požadavků na robustnost systému měření je i schopnost měřit „správně“ frekvenci i v případě napětí obsahujícího i další harmonické složky superponované na nosný signál. A to i v případě změny frekvence základní harmonické, například vznikem ostrova. Z důvodu možné složitosti a nejednoduchosti správného nastavení filtru i samotného prvku *Frequency/Phase/RMS meter* bylo v této práci zvoleno použití prvku *On-Line Frequency Scanner*. S ohledem na výpočtovou náročnost byla zvolena varianta $n=7$, tedy 16-ti vzorky za periodu základní harmonické. Tím je ošetřena časová náročnost výpočtu algoritmu spolu se zachováním dostačující rychlosti a přesnosti určení frekvence pro účely všech v této práci řešených simulací.

Posledními dvěma odstavci zbývá rozebrat pojem *výpočtová náročnost* a její hodnota pro různé varianty měření frekvence. Existuje několik softwarových nástrojů, které dokážou nějakým způsobem měřit zatížení procesoru počítače během probíhajícího procesu. Nicméně podobně relevantních výsledků, respektive dostatečně vypovídající hodnoty dat, lze dosáhnout i jednodušším způsobem než pomocí speciálního software. Po ukončení každé simulace v programu PSCAD vznikne závěrečný záznam do záložky *Runtime messages*, která je součástí základního panelu programu (v liště dole v okně programu). Jedním z údajů je i položka *Time Summary: Total CPU Time*, která informuje o výpočetním času, který procesoru počítače potřeboval pro všechny výpočty v rámci dané simulace. Tato položka byla využita při hodnocení variant výpočtu frekvence v rámci tohoto benchmarku. Do zmíněného výpočetního času jsou zahrnuty veškeré procesy, které souvisí s prací programu PSCAD počínaje kliknutím na ikonu *Run* a konče ukončením simulace (pomocí ikony *stop* nebo dosažením konečného času simulace – *Duration of run*). To znamená, že do výpočetního času *Total CPU Time* jsou započteny i procesy, které přímo nesouvisí s chodem simulace, jako např. přesuny v rámci plátna (a tím nutností vykreslit danou část schématu), změna zoomu v grafu (a tím nutnost vykreslit průběh v daném časovém okně), atd. Tento fakt znesnadňuje určení času, který byl potřebný čistě pro výpočet programu. Nicméně i přesto se tento údaj dá využít alespoň pro srovnání procesorového času různých simulací (dodrží-li se neaktivita uživatele během průběhu simulace). Právě toto bylo provedeno v rámci tohoto benchmarku. V tab. 11-8 jsou uvedeny časy, které byly potřebné pro určení frekvence postupně všemi variantami řešenými v rámci tohoto benchmarku. První řádek tabulky, označen „bez“, udává výpočetní čas, který byl potřebný pro běh simulace, kdy bylo generován potřebný signál průběhu pro požadavek na generování konkrétního napětí v prvcích napěťových zdrojů. Generovaný signál měl tvar stejný jako ve druhé simulaci tohoto benchmarku a trvání simulace bylo 5 sekund. Další řádky se už logicky vážou k jednotlivým variantám měření frekvence, kdy byly zapínány a vypínány jednotlivé vrstvy projektu benchmarku tak, aby byla ve funkci vždy právě požadovaná varianta měření frekvence. Vzhledem k tomu, že výpočtový čas se většinou liší i u naprosto totožné simulace (dáno dalšími procesy procesoru daného PC (procesy Windows a dalších programů)), bylo provedeno postupně měření celé sady variant čtyřikrát za sebou. Tím byl minimalizován vliv změny výpočetní kapacity procesoru vlivem ostatních procesů v PC. Čas uvedený v tab. 11-8 je průměr dvou prostředních hodnot dané varianty.

tab. 11-8: Srovnání výpočtového času pro varianty měření frekvence v rámci programu PSCAD

Varianta	Total CPU Time
bez	3477
7h	4180
15h	4633
31h	5860
63h	11157
127h	31930
255h	120586
FM	3610
FMf	3922

Výpočetní náročnost prostředků pro určování frekvence pomocí prvku *On-Line Frequency Scanner* v porovnání s výpočtovou náročností prvku *Frequency/Phase/RMS meter* je vyšší. V případě využití prvku *Frequency/Phase/RMS meter* s variantou použití filtru (*FMf*) je výpočetní náročnost navýšena nejen o nutnost průběhu algoritmu v rámci prvku filtru, ale i funkcí následujících napěťových zdrojů, které musí generovat „silový“ signál pro prvek *Frequency/Phase/RMS meter*.

12 ZÁVĚR

Problematika provozu elektroenergetických systémů je dlouhodobě hojně řešeným tématem. Se současnými možnostmi výpočetní techniky a stavem poznání matematické interpretace elektromagnetických dějů se do popředí zájmu dostává možnost alternativně testovat výrobní moduly – jejich vlastnosti a funkce, pomocí počítačových simulací. Správně a kvalitně zpracované modely výrobních modulů jsou však pro toto podmínkou. Robustní a funkčně bohaté modely výrobních modulů pak přináší celou řadu dalších uplatnění, které byly vzaty do úvahy při realizaci v této práci postulovaných modelů.

12.1 Splnění cílů práce

Tato práce si dala za cíl vytvořit a simulacemi validovat dynamické modely 3f nesynchronních výrobních modulů (NVM) a synchronních výrobních modulů (SVM). V úvodních kapitolách je popsán současný stav problematiky, který je potřeba přijmout pro správnou interpretaci výstupů této práce. Praktické kapitoly jsou zaměřeny na popis požadavků a popis realizovaných funkcí dynamických modelů, na něž navazuje jejich validace, ve kterých jsou zahrnuty všechny relevantní funkce, které jsou definovány RfG, PPDS, ČSN EN 50549 a ČSN EN 50538. Právě požadavky na simulace souladu definované RfG jsou jednou z oblastí, pro které mohou modely plnit účel. Jde o do vysoké míry univerzální modely, které reprezentují dvě základní skupiny zdrojů – NVM (měničové zdroje) a SVM (synchronní generátory). Třetím modelem VM je zdroj reprezentovaný ideálním napěťovým zdrojem, jehož výhodou je nižší výpočetní náročnost při zachování vlastností NVM či SVM v rámci mnoha typů simulací.

Druhým stěžejním bodem této práce byla realizace modelu agenta, který nevychází z konkrétních legislativních definic (z důvodu jejich absence), nýbrž z obecných požadavků a definic vlastností různých typů agentů, které mohou být uvažovány, a které se mohou v rámci provozu sítí uplatnit. Tímto je otevřena problematika multiagentních systémů (MAS), které jsou v podstatě funkčními prvky tzv. chytrých sítí nebo lépe řečeno prvky, které se s implementací zejména komunikačních a digitalizovaných technologií uplatňují v čím dál větší míře v rámci řešení provozu sítí. Práce nabízí nejen zmapování potenciálu MAS, ale i jejich návaznost do konkrétních struktur řízení VM v rámci synchronních a ostrovních provozů. Aby vlastnosti a funkce MAS mohly být pomocí prezentovaných modelů plně simulovány, nechybí u všech relevantních modelů komunikační vrstva (spolu s popisem její filozofie), která umožňuje skutečnou implementaci libovolných algoritmů řízení či různých úrovní inteligence do simulačního prostředí programu PSCAD.

Všechny vytyčené cíle práce byly splněny.

12.2 Shrnutí poznatků a přínosů práce

Pro samotnou realizaci cílů práce bylo nutné pojmout celou řadu dílčích témat, které se vážou ke komplexnímu výstupu této práce. Především pak bylo nutné provázat všechna dotčená dílčí témata do rámce konstrukce, vlastností a funkcí postulovaných modelů. Práce tak přináší jednak popis současného stavu mnoha dílčích elementů problematiky a úvahy nad dalším vývojem, ale jednak definuje skutečné požadavky na modely VM tak, jak je nutné je chápat a definovat. Vychází se nejen z popisu dílčích elementů v současné odborné literatuře, ale zejména z vlastních úvah nad požadovanou funkcí modelů s ohledem na širokou škálu jejich využití.

Při realizaci modelů zdrojů a agenta byly vždy vzaty do úvahy různé možné stavy provozu. U VM se jedná konkrétně v podstatě o čtyři režimy řízení, které se podařilo realizovat, a to včetně samozřejmých návazností přechodů mezi nimi, spolu s ošetřením tzv. režimu sledování, který se uplatňuje u v daném čase nevyužívaných regulačních režimů. S ohledem na robustnost prezentovaných modelů a ohledem na provoz MAS v různých stavech sítě jsou v modelech VM implementovány řídicí algoritmy nejen pro režim klasického synchronního provozu – P-Q regulace (režim slave), ale i řídicí algoritmy schopny realizovat řízení v rámci ostrovního provozu – U/f regulace (režim pilotního uzlu, režim master). Samozřejmostí je realizace logiky řízení (vč. možností uživatelských nastavení regulátorů) a ošetření přechodů mezi různými typy regulací. Nechybí režim fázování, který dokáže inicializovat zdroj s cílem splnit fázovací podmínky zdroje a sítě a režim resynchronizace, který je schopen realizovat plynulý přechod z U/f regulace do P-Q regulace při současném splnění synchronizačních podmínek. Logika přechodů mezi jednotlivými režimy je uživatelsky snadno nastavitelná, což je jeden z předpokladů pro široké možnosti využití postulovaných modelů. Možnosti nastavení modelů VM jsou doplněny i dalšími užitečnými návaznostmi jako je například speciální nastavení regulace pro najetí na požadovaný výkon po přifázování zvolenou rampou nárůstu výkonu i vlastním nastavením regulátorů právě pro tento proces – to umožňuje rychlejší dosažení potřebného stavu simulace pro možnosti provádění různých testů, které vycházejí právě z ustáleného provozního stavu.

Do struktury řízení VM je implementována řada funkcí, které se vážou nejen k požadavkům na VM dle RfG, (jako jsou např. frekvenčně závislý režim; frekvenčně závislý režim při podfrekvenci a nadfrekvenci; regulace s cílem obnovení frekvence; přechod do provozu na vlastní spotřebu; regulace činného výkonu, jalového výkonu, účinníku a napětí dle požadovaných hodnot; dodávka rychlého poruchového proudu (u NVM); a schopnost zajišťovat umělou setrvačnost (u NVM)), ale které se vážou i k dalším požadavkům na VM dle PPDS, ČSN EN 50549 a ČSN EN 50538 (jako jsou např. různé varianty PQU řízení).

Pro realizaci modelů bylo koncipováno a definováno modulové uspořádání, které tak rozděluje model na dílčí celky. Každý celek – modul, má definovanou svoji úlohu a má jasně definované hranice. Přínosem tohoto řešení je rozčlenění komplexního modelu na jednotlivé části, které lze snadněji popsat, nastavovat a případně modifikovat, či dokonce nahrazovat alternativami podle potřeb uživatele. Nespornou výhodou a přínosem je možnost uplatnění některých modulů nebo jejich částí ve více modelech.

Minoritní část činnosti byla věnována i vytvoření dalších pomocných modelů, které nejsou přímo popisovány v rámci této práce (modely vedení, odbočkového transformátoru atd.) Model, který však bylo nutné předložit je model sítě, který dokáže reprezentovat nadřazenou síť nebo zbytek sítě pro různé typy simulací, včetně nastavitelných vlastností jako tvrdost sítě – impedance sítě, výkonové číslo, deaktivace primární regulace frekvence a činného výkonu atd.

Práce jako celek přináší ucelenou strukturu počítačových modelů zakomponovanou do simulačního prostředí programu PSCAD, která pracuje jako komplexní nástroj pro studium celé řady dějů a stavů provozu elektrické sítě.

12.3 Význam a využití dosaženého stavu práce

Postulované modely nalézají uplatnění v rámci široké škály studií, které lze provádět s jejich využitím. Hlavní devizou modelů VM je jejich implementace do simulačního prostředí programu PSCAD, které je primárně určeno pro tzv. dynamické simulace. Možnosti počítačových výpočtů

elektromagnetických přechodných jevů v časové oblasti je nutné pro správnou interpretaci různých jevů, dějů a stavů, které mohou v elektroenergetickém systému nastat.

Primární zaměření využití modelů bylo směřováno k uplatnění při simulacích souladu podle RfG. Nicméně byla by škoda zaměřovat se v rámci funkcí a vlastností modelů pouze na tuto oblast. S využitím přesahu práce do oblasti řízení sítí v různých provozních stavech, implementace mezimodelové komunikační vrstvy, realizace dalších modelů prvků elektrizační soustavy atd., předurčuje výstupy této práce k širokým možnostem využití.

Možnosti využití postulovaných modelů daleko přesahuje rámec popisovaný v praktických kapitolách této práce. Díky použité koncepci architektury, rozmanitosti a škále aplikovaných funkcí modelů a díky možnostem simulačního prostředí programu PSCAD (simulace v časové rovině – tzv. dynamické simulace), lze výstupy této práce použít pro studium celé řady dějů a stavů, které mohou během provozu sítě nastat. Z pohledu load-flow analýz lze sledovat chování a práci výroben při různém nastavení PQU charakteristik, při různých režimech provozu soustavy (různých parametrech napětí a frekvence) a optimalizovat tak např. provoz z pohledu konkrétního ukazatele (např. ztrát, kvality elektrické energie apod.). Z pohledu dynamických dějů lze studovat chování a práci zdrojů při jejich různém nastavení nejen obecných parametrů, ale i při různém nastavení měřicích a řídicích obvodů, ochranných funkcí, komunikace atd. To vše během různých dynamických dějů, jako je např. proces fázování, změny žádaných hodnot parametrů, zkratů a různé poruchy a na ně navazující pokusy o přechody do ostrovních provozů apod. V neposlední řadě mohou postulované modely pomoci koordinovat nastavení fungování tzv. chytrých sítí, díky aplikované vrstvě komunikace, pomocí níž lze snadno aplikovat jakýkoliv algoritmus řízení sítě, ať už se jedná o lokální síť nebo velký energetický celek.

S realizací komunikační vrstvy modelů lze zkoumat i různé formáty řízení zdrojové základny sítě, které se mohou odkazovat právě na komunikaci, anebo na uplatnění síťových parametrů jako je zejména velikost napětí a její frekvence se vzájemnými vazbami mezi VM v dané síti. Dalším příkladem využití může být např. zakomponování agentů do struktury řízení zdrojů prostřednictvím komunikace, jejich měření skrze nadřazený řídicí (dispečerský) systém, nebo přímo komunikací s příslušným VM.

12.4 Další postup

Dalším postupem pro rozšíření možností simulací by měla být tvorba modelu akumulárního systému. Pro ten je možné využít již vytvořenou architekturu modelů a lze použít i konkrétní moduly (měření, ochrany, komunikace). Další cestou možného postupu je sestavení dalších používaných řídicích algoritmů výrobních modulů. Opět lze použít některé funkce, které jsou již definovány a sestaveny v rámci této práce (funkce tvorby žádaných hodnot výkonů, algoritmy PQU regulací, frekvenčně závislé režimy atd.). Samozřejmě se nabízí možnost implementace jakékoliv změny či inovace řídicích algoritmů. Díky možnostem programu PSCAD by bylo možné aplikovat, resp. simulovat aplikaci různých algoritmů chytrých sítí, jako např. genetické algoritmy apod., s jejichž aplikací je v odborné literatuře počítáno v rámci provozu budoucích sítí. Tato možnost se dá rozšířit pro další generaci modelu agenta, který mohl disponovat určitou vyšší formou inteligence a tím i schopností rozhodovat o stavu provozu sítí na obou stranách svého vypínače. Navíc, model agenta lze rozšířit i o další možnosti ovlivnění sítě – integrace jim řízeného kompenzátoru v jeho místě připojení, který by uměl regulovat parametry sítě v požadovaném rozsahu v závislosti na nastavených požadavcích.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

1f	Jednofázový/é/á/ou	LoM	Loss of Mains (ekvivalent pojmu Ztráta sítě)
3f	Trojfázový/é/á/ou	LPF	Low-Pass Filter
AA	Auction Agent	LVRT	Low Voltage Ride Through
AC	Alternating Current	MAF	Mid-term Adequacy Forecast
aFRP	Automatic Frequency Restoration Process (Automatický proces obnovení frekvence a výkonové rovnováhy)	MAS	Multi-Agent System (Multiagentních systém)
AOP	Agent-oriented Programming	mFRP	Manual Frequency Restoration Process (Ručně ovládaný proces obnovení frekvence)
ASRU	Automatická sekundární regulaci napětí	MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu
BES	Bulk Electric System (ekvivalent pojmu Přenosová soustava)	NAP	Národní akční plán
BRKO	Biologicky rozložitelný komunální odpad	NC	Network Code (Kodex PS)
BS	Black Start (Start ze tmy)	NEKP	Národní energeticko-klimatický plán
CBA	Circuit Breaker Agent	NN	Nízké napětí
CIGRE	Conseil international des grands réseaux electriques (International Council on Large Electric Systems)	nn	Nízko napěťový/é/á/ou
CIRE	Congrès international des réseaux électriques de distribution (International Conference on Electricity Distribution)	NVM	Nesynchronní výrobní modul
ČR	Česká republika	OP	Ostrovni provoz
ČSN	Česká technická norma	OVRT	Over Voltage Ride Through
DA	Disconnecter Agent	OZ	Opětné zapínání
DC	Direct Current	OZE	Obnovitelné zdroje energie
DER	Distributed Energy Resources	P2G	Power-to-Gas
DFIG	Doubly Fed Induction Generators	PA	Point of Common Coupling Agent
D-FLISR	Distributed FLISR	PDS	Provozovatel distribuční soustavy
DGA	Distributed Generator Agent	PE	Parní elektrárna
DS	Distribuční soustava	PLDS	Provozovatel lokální distribuční soustavy
DSC	Distribution System Code (PPDS)	PLL	Phase Locked Loop (Fázový závěs)
DSO	Distribution System Operator (PDS)	PLS	Power Line Signaling
EDU	Elektrárna Dukovany	PMU	Phasor Measurement Unit
EMT	Electro-Magnetic Transient	PPDS	Pravidla provozování distribuční soustavy
EMTDC	Electro-Magnetic Transient Direct Current	PPLDS	Pravidla provozování lokální distribuční soustavy
EMTP	Electromagnetic Transients Program	PPPS	Pravidla provozování přenosové soustavy (Kodex PS)
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity	PPS	Provozovatel přenosové soustavy
ERÚ	Energetický regulační úřad	PS	Přenosová soustava
ES	Elektrizační soustava	PSCAD	Power System Computer Aided Design
EU	Evropská unie	PSS	Power System Stabilizer
FA	Feeder Agent	REMTF	Renewable Energy Modeling Task Force
FACTS	Flexible AC Transmission Systems	RES	Renewable Energy Sources (OZE)
FCP	Frequency Containment Process (ekvivalent pojmu Primární regulace frekvence)	RfG	Requirements for Generators
FDI	Fault Detection and Isolation	RGCE	Regional Group Continental Europe (Regulační oblast kontinentální Evropy)
		RMS	Root Mean Square (ekvivalent pojmu Efektivní hodnota)
		RoCoF	Rate of Change of Frequency

FDIR	Fault Detection, Isolation, and Recovery	RR	Replacement Reserve
FDISR	Fault Detection, Isolation, and Service Restoration	RRP	Reserve Replacement Process
FFR	Fast Frequency Response (rychlá frekvenční odezva)	RT	Real Time
FFT	Fast Fourier Transform (Rychlá Fourierova transformace)	SA	Sectionalizing Agent, Substation Agent, Storage Agent
FLISR	Fault Location, Isolation, and Service Restoration	SAIDI	System Average Interruption Duration Index
FRT	Fault Ride Through	SAIFI	System Average Interruption Frequency Index
FSM	Frequency Sensitive Mode (Frekvenčně závislý režim)	SDC	System Development Committee
FVE	Fotovoltaická elektrárna	SEK	Státní energetická koncepce
GA	Generator Agent, Generation Agent, Grid Agent	SG	Smart grids, Synchronous Generator, Synchronní generátor
GUI	Graphical User Interface (Grafické uživatelské rozhraní)	SKŘ	Systém kontroly a řízení
HDO	Hromadné dálkové ovládání	SRUQ	Sekundární regulace napětí a jalového výkonu
HVDC	High-Voltage Direct Current	SSA	Substation-Side Agent, Sectionalizing Switch Agent
IBG	Inverter-Based Generator	STATCOM	Static Synchronous Compensator
IEC	International Electrotechnical Commission	STU	Smart Terminal Unit
IED	Intelligent Electronic Device (Inteligentní elektronické zařízení)	SVM	Synchronní výrobní modul
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor (Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem)	SVR	Služby výkonové rovnováhy
JE	Jaderná elektrárna	SyS	Systémové služby
KVET	Kombinovaná výroba elektrické energie a tepla	TA	Tie Agent
LA	Load Agent, Line Agent	TC	Technical Committee
LDS	Lokální distribuční soustava	TSA	Tie Switch Agent
LFSM-O	Limited Frequency Sensitive Mode — Overfrequency (Omezený frekvenčně závislý režim při nadfrekvenci)	TSO	Transmission System Operator (PPS)
LFSM-U	Limited Frequency Sensitive Mode — Underfrequency (Omezený frekvenčně závislý režim při podfrekvenci)	TYNDP	Ten-Year Network Development Plan
LOLE	Loss of Load Expectation	UO	Uzlová oblast
		UVRT	Under Voltage Ride Through
		VM	Výrobní modul
		VN	Výsové napětí
		vn	Vysoko napěťový/é/á/ou
		VSC	Voltage-Source Converter
		VTE	Větrná elektrárna
		VVN	Velmi vysoké napětí
		WECC	Western Electricity Coordinating Council
		WG	Working Group
		ZA	Zone Agent
		ZVN	Zvláště vysoké napětí

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Nařízení Komise (EU) 2016/631: ze dne 14. dubna 2016, kterým se stanoví kodex sítě pro požadavky na připojení výroben k elektrizační soustavě.*
- [2] *Kodex přenosové soustavy: Část I. Základní podmínky pro užívání přenosové soustavy.* ročník 2020.
- [3] KUBÍN, Miroslav. *Proměny české energetiky: historie, osobnosti, vědecko-technický rozvoj.* [Praha]: Český svaz zaměstnavatelů v energetice, c2009. ISBN 97880-254-4524-2.
- [4] KUBÍN, Miroslav. *Rozvoj energetiky Jižní Moravy.* [Brno]: Jihomoravská energetika, [1993].
- [5] *Energetický regulační úřad* [online]. 2014–2020 [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/cs/zpravy-o-provozu-elektrizacni-soustavy>
- [6] *TYNDP 2018 Executive Report: Connecting Europe: Electricity 2025 - 2030 - 2040.* 2018.
- [7] *Final ENTSOs' TYNDP 2020 Scenario Storylines.* 2019.
- [8] *MAF 2018 Edition: Mid-term Adequacy Forecast.* 2018.
- [9] *Mid-term Adequacy Forecast 2018: Appendix 1: Methodology and Detailed Results.* 2018.
- [10] *Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040: (MAF CZ).* 2019.
- [11] *Aktualizace Státní energetické koncepce České republiky.* 2014.
- [12] *Doplňující analytický materiál k návrhu aktualizace Státní energetické koncepce.* 2014.
- [13] *Kodex přenosové soustavy: Část VII. Zařízení PS.* ročník 2015.
- [14] *Zákon o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon).* ročník 2000, Zákon 458/2000 Sb.
- [15] *ČEPS* [online]. 2018 [cit. 2018-02-28]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/cinnosti>
- [16] *ENTSO-E* [online]. 2018 [cit. 2018-02-30]. Dostupné z: <https://www.entsoe.eu/>
- [17] TOMAN, Petr. *Provoz distribučních soustav.* Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [18] *Pravidla provozování distribučních soustav.* ročník 2016.
- [19] *Vyhláška o dispečerském řízení elektrizační soustavy a o předávání údajů pro dispečerské řízení.* 2010, Vyhláška 79/2010 Sb.
- [20] *Elektrotechnická měření.* BEN – technická literatura, 2011. ISBN 978-80-7300-310-4.
- [21] *Středoškolská fyzika: doplněk: Fyzika – elektrotechnika 2. část.* 2006. ISBN 999-00-001-7424-9.
- [22] TLUSTÝ, Josef. *Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav.* Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04940-2.
- [23] *IEEE Standard Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations.* 2008. electronic ISBN: 978-0-7381-5778-8.
- [24] *615 series: Technical Manual.* 2018. Document ID: 1MRS756887.
- [25] *Kodex přenosové soustavy: Část V. Bezpečnost provozu a kvalita na úrovni PS.* ročník 2018.
- [26] MASLO, Karel a Martin PROCHAZKA. Frequency measurement in the power system. *2018 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE).*

- IEEE, 2018, 2018, 1-5. ISBN 978-1-5386-4612-0. Dostupné z: doi:10.1109/EPE.2018.8395979
- [27] ROSCOE, Andrew J., Adam DYSKO, Ben MARSHALL, Martin LEE, Harold KIRKHAM a Gert RIETVELD. The Case for Redefinition of Frequency and ROCOF to Account for AC Power System Phase Steps. *2017 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS)*. IEEE, 2017, 2017, 1-6. ISBN 978-1-5386-0343-7. Dostupné z: doi:10.1109/AMPS.2017.8078330
- [28] UIJLINGS, Willem a Jurgen TIMPERT. *RoCoF Alternative Solutions Technology Assessment: High level assessment of frequency measurement and FFR type technologies and the relation with the present status for the reliable detection of high RoCoF events in a adequate time frame*. 2015. Report No.: 16011111, Rev. 005.
- [29] *Kodex přenosové soustavy: Část II. Podpůrné služby (PpS)*. ročník 2021.
- [30] ŠVEC, Jan. *Regulace frekvence a napětí v ES*. 2016. Prezentace ČVUT.
- [31] *P1 – Policy 1: Load-Frequency Control and Performance [C]*. Dostupné také z: https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/pre2015/publications/ce/oh/Policy1_final.pdf
- [32] SPAHIC, Ervin, Deepak VARMA, Gunther BECK, German KUHN a Volker HILD. Impact of reduced system inertia on stable power system operation and an overview of possible solutions. *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*. IEEE, 2016, 2016, 1-5. ISBN 978-1-5090-4168-8. Dostupné z: doi:10.1109/PESGM.2016.7741714
- [33] ULBIG, Andreas, Tobias RINKE, Spyros CHATZIVASILEIADIS a Goran ANDERSSON. Predictive control for real-time frequency regulation and rotational inertia provision in power systems. *52nd IEEE Conference on Decision and Control*. IEEE, 2013, 2013, 2946-2953. ISBN 978-1-4673-5717-3. Dostupné z: doi:10.1109/CDC.2013.6760331
- [34] *Rate of Change of Frequency (RoCoF) withstand capability: ENTSO-E guidance document for national implementation for network codes on grid connection*. 2018.
- [35] KOVALTCHOUK, Thibaut, Vincent DEBUSSCHERE, Seddik BACHA, Mirko FIACCHINI a Mazen ALAMIR. Assessment of the impact of frequency containment control and synthetic inertia on intermittent energies generators integration. *2016 Eleventh International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*. IEEE, 2016, 2016, 1-8. ISBN 978-1-5090-2464-3. Dostupné z: doi:10.1109/EVER.2016.7476361
- [36] *High Penetration of Power Electronic Interfaced Power Sources (HPoPEIPS): ENTSO-E Guidance document for national implementation for network codes on grid connection*. 2017.
- [37] EKANAYAKE, J. a N. JENKINS. Comparison of the Response of Doubly Fed and Fixed-Speed Induction Generator Wind Turbines to Changes in Network Frequency. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2004, 19(4), 800-802. ISSN 0885-8969. Dostupné z: doi:10.1109/TEC.2004.827712
- [38] ERIKSSON, Robert, Niklas MODIG a Katherine ELKINGTON. Synthetic inertia versus fast frequency response: a definition. *IET Renewable Power Generation*. 2018, 12(5), 507-514. ISSN 1752-1416. Dostupné z: doi:10.1049/iet-rpg.2017.0370
- [39] TEMTEM, Salim a Karen CREIGHTON. *Summary of Studies on Rate of Change of Frequency events on the All-Island System*. 2012.

- [40] GONZALEZ-LONGATT, Francisco M. Activation schemes of synthetic inertia controller for full converter wind turbine generators. *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*. IEEE, 2015, 2015, 1-5. ISBN 978-1-4799-7693-5. Dostupné z: doi:10.1109/PTC.2015.7232292
- [41] GONZALEZ-LONGATT, F., E. CHIKUNI a E. RASHAYI. Effects of the Synthetic Inertia from wind power on the total system inertia after a frequency disturbance. *2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. IEEE, 2013, 2013, 826-832. ISBN 978-1-4673-4569-9. Dostupné z: doi:10.1109/ICIT.2013.6505779
- [42] BONFIGLIO, Andrea, Marco INVERNIZZI, Alessandro LABELLA a Renato PROCOPIO. *Design and Implementation of a Variable Synthetic Inertia Controller for Wind Turbine Generators*. IEEE, 2019, 2019, 1-1. ISBN 978-1-7281-1981-6. Dostupné z: doi:10.1109/PESGM40551.2019.8973747
- [43] LIU, Kangcheng, Yanbin QU, Hak-Man KIM a Huihui SONG. Avoiding Frequency Second Dip in Power Unreserved Control During Wind Power Rotational Speed Recovery. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2018, 33(3), 3097-3106. ISSN 0885-8950. Dostupné z: doi:10.1109/TPWRS.2017.2761897
- [44] MORREN, J., S.W.H. DE HAAN, W.L. KLING a J.A. FERREIRA. Wind Turbines Emulating Inertia and Supporting Primary Frequency Control. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2006, 21(1), 433-434. ISSN 0885-8950. Dostupné z: doi:10.1109/TPWRS.2005.861956
- [45] DÍAZ-GONZÁLEZ, Francisco, Melanie HAU, Andreas SUMPER a Oriol GOMIS-BELLMUNT. Participation of wind power plants in system frequency control: Review of grid code requirements and control methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014, 34, 551-564. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2014.03.040
- [46] DREIDY, Mohammad, H. MOKHLIS a Saad MEKHILEF. Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, 69, 144-155. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2016.11.170
- [47] *Pravidla provozování distribučních soustav: Příloha 4 Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulčních zařízení se sítí provozovatele distribuční soustavy*. ročník 2018.
- [48] ČSN EN 50549-1 (330127). *Požadavky na paralelně připojené výrobní sítě s distribučními sítěmi – Část 1: Připojení k distribuční síti nn – Výrobní do typu B včetně*. 2019.
- [49] ČSN EN 50549-2 (330127). *Požadavky na paralelně připojené výrobní sítě s distribučními sítěmi – Část 2: Připojení k distribuční síti středního napětí – Výrobní do typu B a včetně*. 2019.
- [50] *Metodika ověření souladu s požadavky RfG pro výrobní moduly typu C a D: 2.fáze: Simulace souladu pro synchronní a nesynchronní výrobní moduly*. 2020.
- [51] ČSN EN 50438 ed. 2 (330127). *Požadavky na paralelní připojení mikrogenerátorů s veřejnými distribučními sítěmi nízkého napětí*. 2014.
- [52] FprEN 50549-2. *Requirements for generating plants to be connected in parallel with distribution networks – Part 2: Connection to a MV distribution network*.
- [53] PNE 33 3430-8-1. *Požadavky pro připojení generátorů nad 16 A na fázi do distribučních sítí – Část 8-1: Síť nn*. 2015.
- [54] *Nařízení Komise (EU) 2017/1485: ze dne 2. srpna 2017, kterým se stanoví rámcový pokyn pro provoz elektroenergetických přenosových soustav*. 2017.

-
- [55] YAMASHITA, Koji, Herwig RENNER, Sergio MARTINEZ VILLANUEVA, et al. Industrial Recommendation of Modeling of Inverter-Based Generators for Power System Dynamic Studies With Focus on Photovoltaic. *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*. 2018, 5(1), 1-10. ISSN 2332-7707. Dostupné z: doi:10.1109/JPETS.2018.2806744
- [56] POURBEIK, Pouyan, Juan SANCHEZ-GASCA, Jayapalan SENTHIL, et al. *Generic Dynamic Models for Modeling Wind Power Plants and other Renewable Technologies in Large Scale Power System Studies*. IEEE, 2018, 2018, 1-1. ISBN 978-1-5386-7703-2. Dostupné z: doi:10.1109/PESGM.2018.8585944
- [57] GÖKSU, Ö., SORENSEN, Poul & FORTMANN, Jens, MORALES, A., WEIGEL, S., POURBEIK, Pouyan. *Compatibility of IEC 61400-27-1 Ed 1 and WECC 2nd Generation Wind Turbine Models*. 2016.
- [58] LAMMERT, Gustav, Koji YAMASHITA, Luis David PABÓN OSPINA, Herwig RENNER, Sergio MARTÍNEZ VILLANUEVA a POURBEIK. Modelling and dynamic performance of inverter based generation in power system studies: an international questionnaire survey. *CIREN – Open Access Proceedings Journal*. 2017, 2017(1), 1-4. ISSN 2515-0855. Dostupné z: doi:10.1049/oap-cired.2017.0898
- [59] *Modelling of inverter-based generation for power system dynamic studies*. 2018. ISBN 978-2-85873-429-0.
- [60] MARTINS, José. *Activities of the Joint Working Group CIGRE C4/C6.35/CIREN: Modelling and Dynamic Performance of Inverter Based Generation in Power System Transmission and Distribution Studies*. 1st International Conference on Large-Scale Grid Integration of Renewable Energy in India. 2017.
- [61] SU, Liping, Guojie LI a Zhijian JIN. Modeling, control and testing of a voltage-source-inverter-based microgrid. *2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*. IEEE, 2011, 2011, 724-729. ISBN 978-1-4577-0364-5. Dostupné z: doi:10.1109/DRPT.2011.5993987
- [62] LOPES, J.A.P., C.L. MOREIRA a A.G. MADUREIRA. Defining Control Strategies for MicroGrids Islanded Operation. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2006, 21(2), 916-924. ISSN 0885-8950. Dostupné z: doi:10.1109/TPWRS.2006.873018
- [63] ZHANG, Zhaoyun, Wei CHEN a Zhe ZHANG. A New Seamless Transfer Control Strategy of the Microgrid. *The Scientific World Journal*. 2014, 2014, 1-9. ISSN 2356-6140. Dostupné z: doi:10.1155/2014/391945
- [64] SEDGHISIGARCHI, Kourosh. Power flow control of inverter based distributed generators in LV microgrids. *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. IEEE, 2011, 2011, 1-6. ISBN 978-1-4577-1000-1. Dostupné z: doi:10.1109/PES.2011.6039521
- [65] LAAKSONEN, Hannu, SAARI, Pekka, KOMULAINEN, Risto. *Control of Voltage and Frequency in Inverter and Synchronous Generator Based Urban LV Microgrid*. 2006.
- [66] MÁŠLO, Karel. *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*. [Praha]: Asociace energetických manažerů, 2013. ISBN 978-80-260-4461-1.
- [67] TEODORESCU, Remus, Marco LISERRE a Pedro RODRÍGUEZ. *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. John Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-05751-3.

- [68] A New Control Method for Single-Phase Grid-Connected Inverter Using Instantaneous Power Theory. *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*. 2016, 5(2), 105-116. Dostupné z: doi:10.22098/joape.2017.2592.1225
- [69] SEDO, Jozef a Slavomir KASCAK. Control of single-phase grid connected inverter system. *2016 ELEKTRO*. IEEE, 2016, 207-212. ISBN 978-1-4673-8698-2. Dostupné z: doi:10.1109/ELEKTRO.2016.7512066
- [70] DE ALVARO GARCIA, Leticia, François BEAUNE, Mathilde PITARD a Laurent KARSENTI. Cost-benefit analysis of MV reactive power management and active power curtailment. *CIREN – Open Access Proceedings Journal*. 2017, 2017(1), 1660-1663. ISSN 2515-0855. Dostupné z: doi:10.1049/oap-cired.2017.0733
- [71] BEAUNÉ, F., O. CARRÉ, S. LEVAUFRE a L. KARSENTI. New solutions for a better distributed generation integration to mv and LV networks. *CIREN Workshop 2016*. Institution of Engineering and Technology, 2016, 203 (4.) -203 (4.). ISBN 978-1-78561-202-2. Dostupné z: doi:10.1049/cp.2016.0803
- [72] CHABOD, E., L. KARSENTI, J. WITKOWSKI a G. MALARANGE. Local voltage regulation influence on DG and distribution network. *CIREN 2012 Workshop: Integration of Renewables into the Distribution Grid*. IET, 2012, 2012, 49-49. ISBN 978-1-84919-628-4. Dostupné z: doi:10.1049/cp.2012.0732
- [73] WAUTIER, Louis, François BEAUNE, Josselin FOURNEL a Laurent KARSENTI. Using LV distributed generation's reactive power for voltage regulation. *CIREN – Open Access Proceedings Journal*. 2017, 2017(1), 2037-2040. ISSN 2515-0855. Dostupné z: doi:10.1049/oap-cired.2017.0233
- [74] WECKX, Sam, Carlos GONZALEZ a Johan DRIESEN. Combined Central and Local Active and Reactive Power Control of PV Inverters. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2014, 5(3), 776-784. ISSN 1949-3029. Dostupné z: doi:10.1109/TSTE.2014.2300934
- [75] DEMIROK, Erhan, Pablo Casado GONZÁLEZ, Kenn H. B. FREDERIKSEN, Dezso SERA, Pedro RODRIGUEZ a Remus TEODORESCU. Local Reactive Power Control Methods for Overvoltage Prevention of Distributed Solar Inverters in Low-Voltage Grids. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2011, 1(2), 174-182. ISSN 2156-3381. Dostupné z: doi:10.1109/JPHOTOV.2011.2174821
- [76] KARSENTI, L., E. LEJAY-BRUN, G. MALARANGE a J. WITKOWSKI. Field Demonstration of Local Voltage Regulation on ERDF MV Network. *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIREN 2013)*. Institution of Engineering and Technology, 2013, 2013, 0494-0494. ISBN 978-1-84919-732-8. Dostupné z: doi:10.1049/cp.2013.0760
- [77] ČSN 33 3051 (333051). *Ochrany elektrických strojů a rozvodných zařízení*. 1992.
- [78] PNE 384065 ed. 4 (384065). *Provoz, navrhování a zkoušení ochrany a automatik*. 2017.
- [79] *Technical guide Protection criteria for medium voltage networks*. ABB, 2016.
- [80] ČSN EN 50160 ed. 3. *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí*. 2011.
- [81] ČSN EN 61000-4-30 ed. 3 (333432). *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-30: Zkušební a měřicí technika – Metody měření kvality energie*. 2017.

- [82] STEINHART, Christoph J., Michael GRATZA, Georg KERBER, Michael FINKEL a Rolf WITZMANN. Determination of load-frequency dependence in island power supply. *CIREN – Open Access Proceedings Journal*. 2017, 2017(1), 1031-1034. ISSN 2515-0855. Dostupné z: doi:10.1049/oap-cired.2017.0312
- [83] GHORBANI, Mohammad Jawad, Muhammad Akram CHOUDHRY a Ali FELIACHI. A Multiagent Design for Power Distribution Systems Automation. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2016, 7(1), 329-339. ISSN 1949-3053. Dostupné z: doi:10.1109/TSG.2015.2453884
- [84] LUKAČ, Marijan a Zdravko MATIŠIĆ. Anti-islanding protection of distributed generators with regard to sensitivity in a balance and power system stability. *CIREN – Open Access Proceedings Journal*. 2017, 2017(1), 943-946. ISSN 2515-0855. Dostupné z: doi:10.1049/oap-cired.2017.0368
- [85] ELMAHALAWZ, Ahmed. Intelligent Agent and Multi Agent Systems. *Journal of Engineering and Technology*. 2. 2012
- [86] SYCARA, Katia. Multiagent Systems. *AI Magazine*. 1997, 19(2), 79-92. ISSN 0738-4602-79 1998.
- [87] HUHNS, Michael, SINGH, M. *Agents and Multiagent Systems: Themes, Approaches and Challenges*. 2014
- [88] BOND, Alan H. a Leslie George GASSER. *Readings in Distributed Artificial Intelligence: Chapter 1 - An Analysis of Problems and Research in DAI*. 1988. Dostupné z: doi:10.1016/C2013-0-07700-6
- [89] GHORBANI, Jawad, Yaser P. FALLAH, Muhammad A. CHOUDHRY a Ali FELIACHI. Investigation of communication media requirements for self healing power distribution systems. *2013 IEEE Energytech*. IEEE, 2013, 2013, 1-7. ISBN 978-1-4673-4444-9. Dostupné z: doi:10.1109/EnergyTech.2013.6645325
- [90] WEISS, Gerhard. *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Modern Approach to Artificial Intelligence*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1999. ISBN 0-262-23203-0.
- [91] MCARTHUR, Stephen D. J., Euan M. DAVIDSON, Victoria M. CATTERSON, Aris L. DIMEAS, Nikos D. HATZIARGYRIOU, Ferdinanda PONCI a Toshihisa FUNABASHI. Multi-Agent Systems for Power Engineering Applications—Part I: Concepts, Approaches, and Technical Challenges. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2007, 22(4), 1743-1752. ISSN 0885-8950. Dostupné z: doi:10.1109/TPWRS.2007.908471
- [92] JAMBORSALAMATI, Pouya, Abhinav SADU, Ferdinanda PONCI a Antonello MONTI. Implementation of an agent based distributed FLISR algorithm using IEC 61850 in active distribution grids. *2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*. IEEE, 2015, 2015, 606-611. ISBN 978-1-4799-9982-8. Dostupné z: doi:10.1109/ICRERA.2015.7418485
- [93] GHORBANI, J. A Decentralized Multi-Agent System Design for Power System Automation. *Multi-Agent Systems: Advances in Energy Research*. 22. Nova Science Publishers, 2015, s. 3-38. ISBN 978-1-63483-230-4.
- [94] STASZESKY, D.M., D. CRAIG a C. BEFUS. Advanced feeder automation is here. *IEEE Power and Energy Magazine*. 2005, 3(5), 56-63. ISSN 1540-7977. Dostupné z: doi:10.1109/MPAE.2005.1507027

- [95] COSTER, E., W. KERSTENS a T. BERRY. Self healing distribution networks using smart controllers. *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*. Institution of Engineering and Technology, 2013, 2013, 0196-0196. ISBN 978-1-84919-732-8. Dostupné z: doi:10.1049/cp.2013.0603
- [96] ANAND, M.P., Weerakorn ONGSAKUL, Jai Govind SINGH a Sajjad GOLSHANNAVAZ. Economic operational Scheduling of a smart distribution network considering demand response, electric vehicles and network reconfiguration. *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*. IEEE, 2015, 1-6. ISBN 978-1-4799-7693-5. Dostupné z: doi:10.1109/PTC.2015.7232645
- [97] HABIB, Hany F., Tarek YOUSSEF, Mehmet H. CINTUGLU a Osama A. MOHAMMED. Multi-Agent-Based Technique for Fault Location, Isolation, and Service Restoration. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017, 53(3), 1841-1851. ISSN 0093-9994. Dostupné z: doi:10.1109/TIA.2017.2671427
- [98] YIP, Tony, Jinghua WANG, Bingyin XU, Kaijun FAN a Tianyou LI. Fast self-healing control of faults in MV networks using distributed intelligence. *CIRED – Open Access Proceedings Journal*. 2017, 2017(1), 1131-1133. ISSN 2515-0855. Dostupné z: doi:10.1049/oap-cired.2017.0511
- [99] SHERBILLA, Nader. Smart fault management scheme for electrical distribution networks. *24th International Conference on Electricity Distribution*. Glasgow, UK: CIRED 2017, 2017, s. 1-5. ISBN 978-1-78561-483-5. ISSN 2032-9644.
- [100] JAMBORSALAMATI, Pouya, Abhinav SADU, Ferdinanda PONCI a Antonello MONTI. Implementation of an agent based distributed FLISR algorithm using IEC 61850 in active distribution grids. *2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*. IEEE, 2015, 2015, 606-611. ISBN 978-1-4799-9982-8. Dostupné z: doi:10.1109/ICRERA.2015.7418485
- [101] IEC 61850-7-4. *International standard: Communication networks and systems for power utility automation – Part 7-4: Basic communication structure – Compatible logical node classes and data object classes*. ed. 2. 2010.
- [102] CHOUHAN, Sridhar, Jawad GHORBANI, Hakan INAN, Ali FELIACHI a Muhammad A. CHOUDHRY. *Smart MAS restoration for distribution system with Microgrids*. IEEE, 2013, 2013, 1-5. ISBN 978-1-4799-1303-9. Dostupné z: doi:10.1109/PESMG.2013.6672945
- [103] ANANDA, Stephanus, Jyh-Cherng GU, Ming-Ta YANG, et al. Multi-Agent System Fault Protection with Topology Identification in Microgrids. *Energies*. 2017, 10(1). ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en10010028
- [104] KUMAR NUNNA, H. S. V. S. a Suryanarayana DOOLLA. Multiagent-Based Distributed-Energy-Resource Management for Intelligent Microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2013, 60(4), 1678-1687. ISSN 0278-0046. Dostupné z: doi:10.1109/TIE.2012.2193857
- [105] FORGUE, Bruno a Pavel VLADYKA. IEC 61850: soubor norem pro komunikaci v energetice s velkým potenciálem výhod. *AUTOMA*. 2010, 2010(03). ISSN 1210-9592.
- [106] LAMMERT, Gustav, YAMASHITA, Koji, RENNERT, Herwig, MARTINEZ, Sergio, POURBEIK, P., CIAUSIU, Florin, PABON, Luis, BRAUN, Manfred. *International Industry Practice on Modelling and Dynamic Performance of Inverter Based Generation in Power System Studies*. Cigre Science & Engineering. 2017. Vol. 8. pp. 25-37.

- [107] *West Virginia Super Circuit Project: Final Report*. Monongahela Power, 2014, 343 s.
- [108] *PSCAD X4 (v4.6) Online Help* [online]. Manitoba Hydro International, 2018 [cit. 2021-01-19]. Dostupné z: https://www.pscad.com/webhelp/ol-help.htm#Opening_Screen.htm
- [109] ELLIOTT, R.T., A. ELLIS, P. POURBEIK, J.J. SANCHEZ-GASCA, J. SENTHIL a J. WEBER. *Generic photovoltaic system models for WECC – A status report*. IEEE, 2015, 2015, 1-5. ISBN 978-1-4673-8040-9. Dostupné z: doi:10.1109/PESGM.2015.7285992
- [110] LAMMERT, Gustav, Luis David Pabon OSPINA, Pouyan POURBEIK, Dirk FETZER a Martin BRAUN. Implementation and validation of WECC generic photovoltaic system models in DIgSILENT PowerFactory. *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*. IEEE, 2016, 2016, 1-5. ISBN 978-1-5090-4168-8. Dostupné z: doi:10.1109/PESGM.2016.7741608
- [111] LAMMERT, Gustav, Koji YAMASHITA, Luis OSPINA, Herwig RENNER, Sergio VILLANUEVA, Pouyan POURBEIK, Florin-Emilian CIAUSIU a Martin BRAUN. *Innovation in the Power Systems industry: International industry practice on modelling and dynamic performance of inverter based generation in power system studies*. vol. 8. Paris: CIGRE, 2017. ISSN 1286-1146.
- [112] *EMTDC Users Guide V4_6_0*. Manitoba HVDC Research Centre.
- [113] IEC 61400-27-1:2015. *Wind turbines – Part 27-1: Electrical simulation models – Wind turbines*. 2015.
- [114] HONRUBIA-ESCRIBANO, Andres, Francisco JIMENEZ-BUENDIA, Emilio GOMEZ-LAZARO a Jens FORTMANN. *Field validation of a standard Type 3 wind turbine model for power system stability, according to the requirements imposed by IEC 61400-27-1*. IEEE, 2018, 2018, 1-1. ISBN 978-1-5386-7703-2. Dostupné z: doi:10.1109/PESGM.2018.8586203
- [115] LIU, Y. J., P. A. CHEN a H. J. SU. Power Control Characteristic of Generic Type-3 Wind Turbine Model Based on IEC 61400-27-1 Standard. *2019 International Conference on Engineering, Science, and Industrial Applications (ICESI)*. IEEE, 2019, 2019, 1-5. ISBN 978-1-7281-2174-1. Dostupné z: doi:10.1109/ICESI.2019.8862992
- [116] GOKSU, Omer, Mufit ALTIN, Jens FORTMANN a Poul E. SORENSEN. Field Validation of IEC 61400-27-1 Wind Generation Type 3 Model With Plant Power Factor Controller. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2016, 31(3), 1170-1178. ISSN 0885-8969. Dostupné z: doi:10.1109/TEC.2016.2540006
- [117] FAVUZZA, S., M. G. IPPOLITO, R. MUSCA, M. S. NAVARRO, NAVIA, E. Riva SANSEVERINO, G. ZIZZO a M. BONGIORNO. System Stability of a Small Island's Network with Different Levels of Wind Power Penetration. *2018 IEEE 4th International Forum on Research and Technology for Society and Industry (RTSI)*. IEEE, 2018, 2018, 1-6. ISBN 978-1-5386-6282-3. Dostupné z: doi:10.1109/RTSI.2018.8548355
- [118] VILLENA-RUIZ, Raquel, Alberto LORENZO-BONACHE, Andrés HONRUBIA-ESCRIBANO, Francisco JIMÉNEZ-BUENDÍA a Emilio GÓMEZ-LÁZARO. Implementation of IEC 61400-27-1 Type 3 Model: Performance Analysis under Different Modeling Approaches. *Energies*. 2019, 12(14). ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en12142690
- [119] SORENSEN, Poul, Jens FORTMANN, Francisco BÚENDÍA, John BECH, A. MORALES a Chavdar IVANOV. Final Draft International Standard IEC 61400-27-1: Electrical

- simulation models of wind turbines November 2014. *13th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Power Plants*. Berlin, Germany, 2014, s. 1-6.
- [120] *WECC Wind Power Plant Dynamic Modeling Guide*. WECC Renewable Energy Modeling Task Force, 2014.
- [121] *WECC PV Power Plant Dynamic Modeling Guide*. WECC Renewable Energy Modeling Task Force, 2014.
- [122] FORTMANN, Jens, Pouyan POURBEIK, Nicholas MILLER, Yuriy KAZACHKOV, John BECH, Björn ANDRESEN a Poul SORENSEN. Wind Plant Models in IEC 61400-27-2 and WECC – latest developments in international standards on wind turbine and wind plant modeling. *14th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Power Plants*. 2015, s. 1-7.
- [123] *PSCAD Knowledge Base: Wind Power* [online]. Manitoba Hydro International, 2019 [cit. 2020-08-16]. Dostupné z: <https://www.pscad.com/knowledge-base/topic-47/v->
- [124] *PSCAD Knowledge Base: Solar Power* [online]. Manitoba Hydro International, 2019 [cit. 2020-08-16]. Dostupné z: <https://www.pscad.com/knowledge-base/topic-48/v->
- [125] *Power-Generating Modules compliance verification: Power-Generating Modules type B, C and D according to NC RfG and Netcode elektriciteit*. Version 1.2.1. Netbeheer Nederland, 2020.
- [126] ULLAH, Nasim, Anwar ALI, Haider ALI a Khalid MAHMOOD. Frequency stability and synthetic inertia. *Variability, Scalability and Stability of Microgrids*. Institution of Engineering and Technology, 2019, 2019-7-29, 377-394. ISBN 9781785616938. Dostupné z: doi:10.1049/PBPO139E_ch11
- [127] ULVGÅRD, Liselotte a Tobias GEHLHAAR. *Ensuring Grid Code Compliance in a New and Changing RfG Landscape*. 1-7.
- [128] *IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*. IEEE Std 421.5™-2016. IEEE Power and Energy Society, 2016. ISBN 978-1-5044-0855-4.
- [129] ČSN 33 0010 ED. 2 (330010). *Elektrická zařízení – Rozdělení a pojmy*. 2014.

SEZNAM PŘÍLOH

název souboru	popis a návaznost
<i>Library_SG.pslx</i>	Knihovna všech modelů a modulů, které vznikly v rámci této práce. Hlavní zdrojový soubor, pomocí kterého lze mimo jiné sestavit všechny níže uvedené projekty.
<i>SMe01U.pscx</i>	Projekt simulace odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci (LFSM-O) pro napěťový zdroj (U), resp. IBG , resp. SG . Popis projektu je v kapitole 11.1.1, strana 244.
<i>SMe01IBG.pscx</i>	
<i>SMe01SG.pscx</i>	
<i>SMe02U.pscx</i>	Projekt simulace odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při podfrekvenci (LFSM-U) pro napěťový zdroj (U), resp. IBG , resp. SG . Popis projektu je v kapitole 11.1.2, strana 250.
<i>SMe02IBG.pscx</i>	
<i>SMe02SG.pscx</i>	
<i>SMe03U.pscx</i>	Projekt simulace odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu (FSM) pro napěťový zdroj (U), resp. IBG , resp. SG . Popis projektu je v kapitole 11.1.3, strana 256.
<i>SMe03IBG.pscx</i>	
<i>SMe03SG.pscx</i>	
<i>SMe04U.pscx</i>	Projekt simulace schopnosti překlenout poruchu (FRT) a obnovení činného výkonu po poruše (Post Fault Active Power Recovery) pro napěťový zdroj (U), resp. IBG , resp. SG . Popis projektů je v kapitolách 11.1.4 a 11.1.5, strany 266 a 270.
<i>SMe04IBG.pscx</i>	
<i>SMe04SG.pscx</i>	
<i>SMe06U.pscx</i>	Projekt simulace ostrovního provozu (Island Operation) pro napěťový zdroj (U), resp. IBG , resp. SG . Popis projektu je v kapitole 11.1.6, strana 271.
<i>SMe06IBG.pscx</i>	
<i>SMe06SG.pscx</i>	
<i>SMe07U.pscx</i>	Projekt simulace schopnosti dodávat jalový výkon (Reactive Power Capability) pro napěťový zdroj (U), resp. IBG , resp. SG . Popis projektu je v kapitole 11.1.7, strana 276.
<i>SMe07IBG.pscx</i>	
<i>SMe07SG.pscx</i>	
<i>SMe08U.pscx</i>	Projekt simulace dodávky rychlého poruchového proudu (Fast Fault Current) pro napěťový zdroj (U), resp. IBG , resp. SG . Popis projektu je v kapitole 11.1.8, strana 281.
<i>SMe08IBG.pscx</i>	
<i>SMe08SG.pscx</i>	
<i>SMe09U.pscx</i>	Projekt simulace schopnosti dodávat jalový výkon (Reactive Power Capability) pro napěťový zdroj (U), resp. IBG , resp. SG . Popis projektu je v kapitole 11.1.9, strana 289.
<i>SMe09IBG.pscx</i>	
<i>SMe09SG.pscx</i>	
<i>SPQU.pscx</i>	Projekt simulace pro ověření funkcí PQU charakteristik. Popis projektu je v kapitole 11.2.1, strana 296.
<i>SMAS.pscx</i>	Projekt simulace pro ověření funkcí MAS, OP a ochran. Popis projektu je v kapitole 11.2.2, strana 300.
<i>B01.pscx</i>	Projekt simulace benchmarku harmonických složek ve vztahu k výpočetnímu kroku simulace. Popis projektu je v kapitole 11.3.1, strana 304.
<i>B02.pscx</i>	Projekt simulace benchmarku pro určení frekvence v simulačním prostředí. Popis projektu je v kapitole 11.3.2, strana 305.

SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA

- [A1] KOPIČKA, M.; TOMAN, P. The development of Smart Grids pilot projects in Europe. In *Proceedings of the 7th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering ELEKTROENERGETIKA 2013*. First. Košice, Slovak Republic: Technical University of Košice, 2013. s. 256-259. ISBN: 978-80-553-1441- 9.
- [A2] TOPOLÁNEK, D.; TOMAN, P.; ORSÁGOVÁ, J.; KOPIČKA, M. The Evaluation of Overvoltage During Short-Time Additional Earthing of Healthy Phase for Fault Location in MV Networks. In *The 12th International Conference on Developments in Power System Protection DPSP2014*. Six Hills Way Stevenage Hertfordshire SG1 2AY UK: The Institution of Engineering and Technology IET, 2014. s. 1-6. ISBN: 978-1-84919-834-9.
- [A3] KOPIČKA, M.; DRÁPELA, J.; TOPOLÁNEK, D. Voltage Regulation Optimization in Low Voltage Network Based on Voltage Quality Index. In *Proceedings of the 2014 15 th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. Brno, Czech Republic: Brno Univ Technol, Fac Elect Engn & Commun, 2014. s. 1-6. ISBN: 978-1-4799-3807-0.
- [A4] KOPIČKA, M.; PTÁČEK, M.; TOMAN, P. Analysis of the Power Quality and the Impact of Photovoltaic Power Plant Operation on Low-Voltage Distribution Network. In *Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ)*. 2014. Rakvere, Estonia: 2014. s. 99-102. ISBN: 978-1-4799-5020-1.
- [A5] KOPIČKA, M.; TOPOLÁNEK, D.; TOMAN, P.; SÍTAŘ, M. *Hodnocení zemnicích soustav a dotykových napětí v okolí odlehklých, příměstských a městských distribučních transformátorů*. 2015. s. 1-53.
- [A6] HROUDA, J.; KYSNAR, F.; KOPIČKA, M.; DRÁPELA, J. Knihovna prvků sítě pro modelování dynamických vlastností OZE v DS v softwaru PSCAD. In *Sborník konference ČK CIRED 2015*. 1. České Budějovice: EGC České Budějovice, 2015. s. 1-18. ISBN: 978-80-905014-4-7.
- [A7] KOPIČKA, M.; SÍTAŘ, M.; TOPOLÁNEK, D.; DVOŘÁK, J. Měření rozložení potenciálu povrchu země u zemnicích soustav transformoven VN/ NN a dotykových napětí v okolí stanic. In *Sborník konference ČK CIRED 2015*. 1. České Budějovice: EGC České Budějovice, 2015. s. 1-13. ISBN: 978-80-905014-4- 7.
- [A8] DRÁPELA, J.; KOPIČKA, M. *Studie poměrů v napájecím systému membránové elektrolýzy SPOLCHEMIE pro návrh kompenzačně- filtrační jednotky*. Brno: VUT v Brně, 2015. s. 1-39.
- [A9] TOMAN, P.; MLÝNEK, P.; BÁTORA, B.; KOPIČKA, M.; TOPOLÁNEK, D. *Analýza možností a přínosů breaker/limiter*. 2016.
- [A10] PTÁČEK, M.; KOPIČKA, M.; PAVELKA, T.; RADIL, L. Modelling of Small Wind Power Plant with Savonius-Darrieus Rotor in the PSCAD. In *Proceedings of the 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. first. Prague, Czech Republic: Czech Technical University in Prague, 2016. s. 204-209. ISBN: 978-1-5090-0907-7.

- [A11] DRÁPELA, J.; KOPIČKA, M. *Analýza síťových poměrů v napájecím systému membránové elektrolýzy FORTISCHEM a.s., Nováky, SK, pro návrh kompenzačně- filtrační jednotky*. Brno: CVVOZE, FEKT, VUT v Brně, 2016. s. 1-35.
- [A12] TOPOLÁNEK, D.; TOMAN, P.; ORSÁGOVÁ, J.; VYČÍTAL, V.; KOPIČKA, M. *Analýza vlivu přizemnění postižené fáze na velikost dotykových a krokových napětí*. 2017. s. 1-79.
- [A13] DRÁPELA, J.; KOPIČKA, M. *Simulace provozu konečného řešení napájecího systému membránové elektrolýzy FORTISCHEM a.s., Nováky, SK, pro ověření návrhu a korekci kompenzačně-filtrační jednotky*. Brno: CVVOZE, FEKT, VUT v Brně, 2017. s. 1-20.
- [A14] DRÁPELA, J.; KOPIČKA, M. *Analýza síťových poměrů v napájecím systému měnirny SLOVALCO a.s., Žiar nad Hronom, SK, pro návrh systému sedmého agregátu s kompenzačně-filtrační jednotkou*. Brno: VUT, 2018. s. 1-54.
- [A15] TOPOLÁNEK, D.; DRÁPELA, J.; VYČÍTAL, V.; KOPIČKA, M., BLAHŮŠEK, R., JURÍK, M. Optimalizace nastavení Q(U) a P(U) charakteristik FVE připojených do soustavy NN. In *Sborník konference ČK CIRED 2019*. 1. České Budějovice: EGC České Budějovice, 2019. s. 1-15. ISBN: 978-80-905014-8-5.
- [A16] KOPIČKA, M.; TOMAN, P.; DRÁPELA, J.; PTÁČEK, M.; NOVÁK, V. Dynamic Modelling Approach to Assess Control Strategies of Distributed Energy Resources. In *CIRED 2019, 25th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*. Madrid, UK: CIRED, 2019. s. 1-5. ISBN 978-2-9602415-0-1.